



**HAL**  
open science

## Adaptation des forêts au changement climatique

Philippe P. Rozenberg

► **To cite this version:**

Philippe P. Rozenberg. Adaptation des forêts au changement climatique. Les Mardis de la Science, Centre Régional de Promotion de la Culture Scientifique, Technique et Industrielle de la Région Centre - Val de Loire (CCSTI). FRA., Jun 2015, Tours, France. hal-02794773

**HAL Id: hal-02794773**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02794773>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Adaptation des forêts au changement climatique

Philippe Rozenberg  
INRA Val de Loire, Orléans

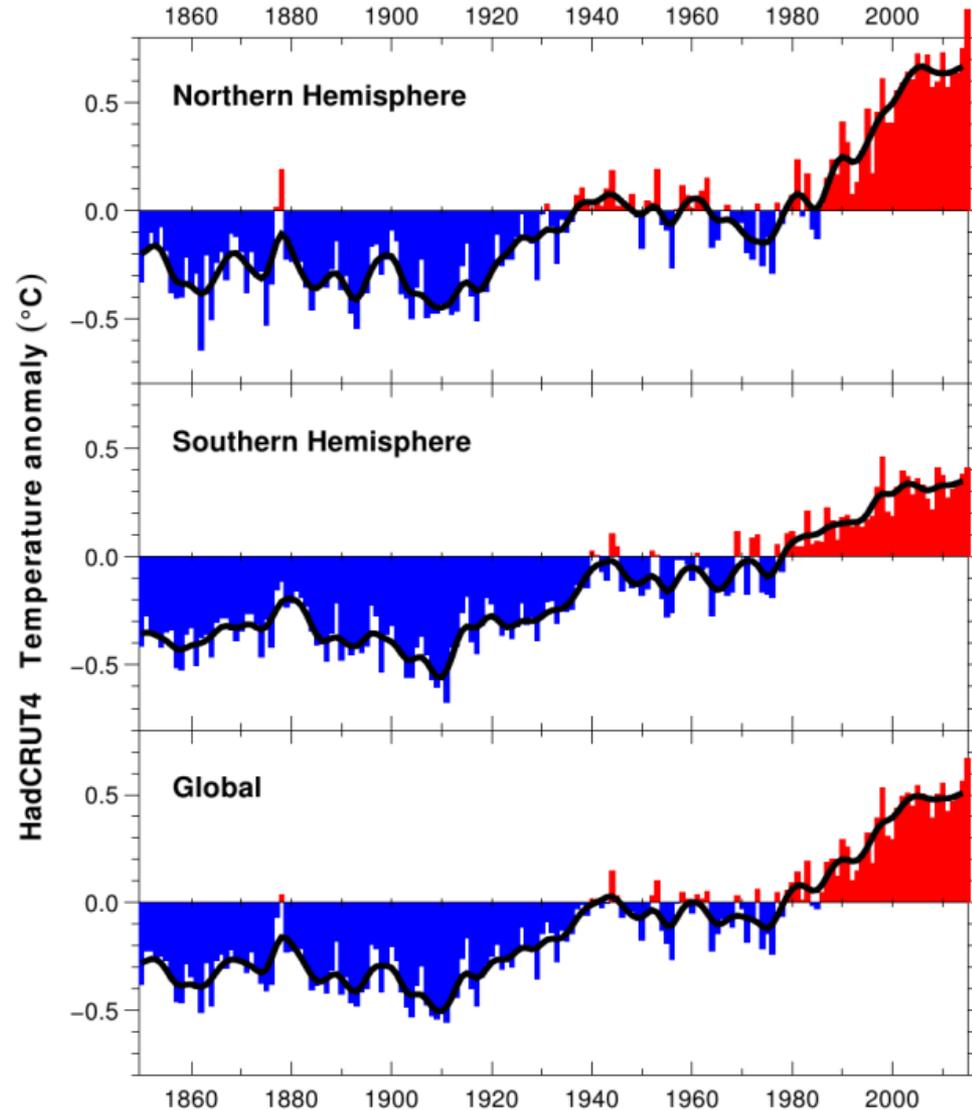
# Changement climatique

## Température :

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4.png> (04/2015)

## Atténuation après 1998 ?

- Kosaka, Yu, et Shang-Ping Xie. 2013. « Recent Global-warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling ». *Nature* advance online publication (août 28). doi:10.1038/nature12534.
- Karl, Thomas R., Anthony Arguez, Boyin Huang, Jay H. Lawrimore, James R. McMahan, Matthew J. Menne, Thomas C. Peterson, Russell S. Vose, et Huai-Min Zhang. 2015. « Possible Artifacts of Data Biases in the Recent Global Surface Warming Hiatus ». *Science*, juin, aaa5632. doi:10.1126/science.aaa5632.



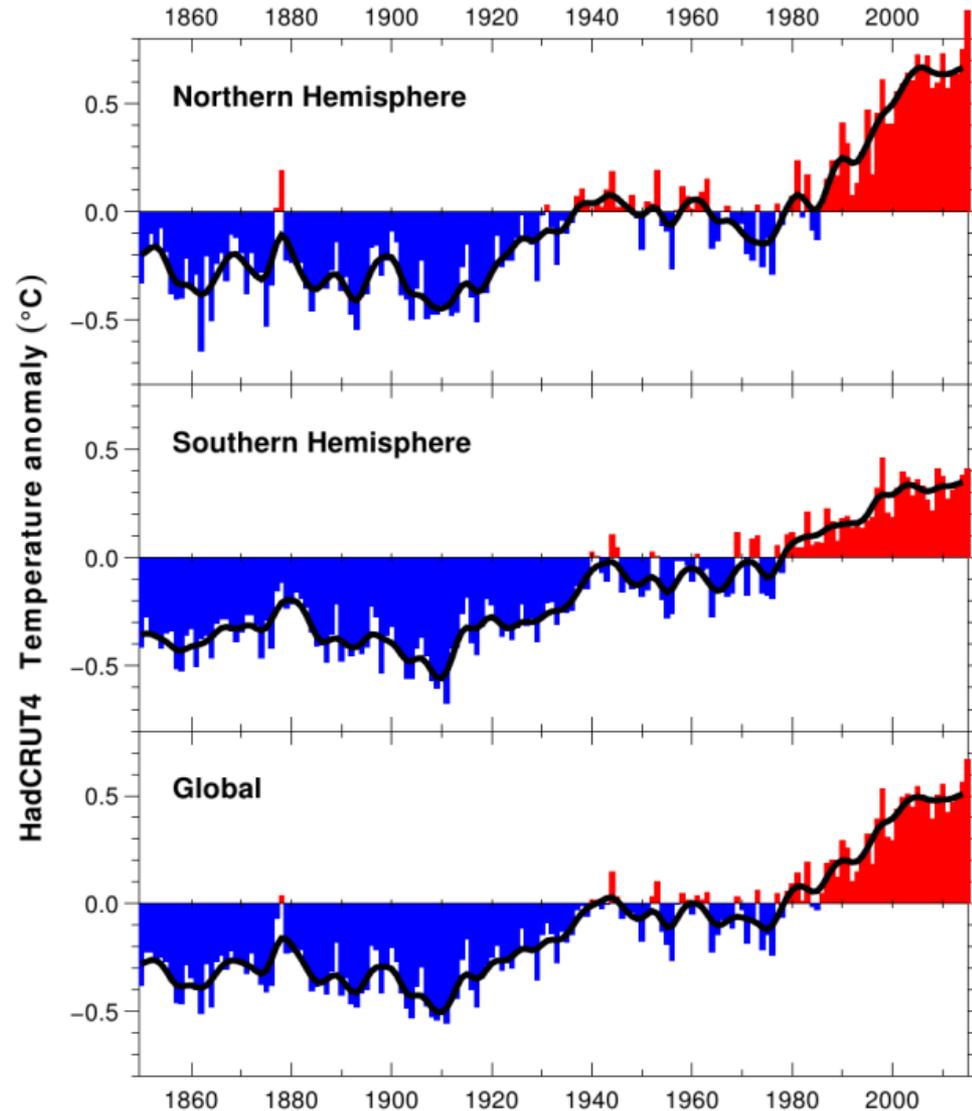
# Changement climatique

## Température :

<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4.png> (04/2015)

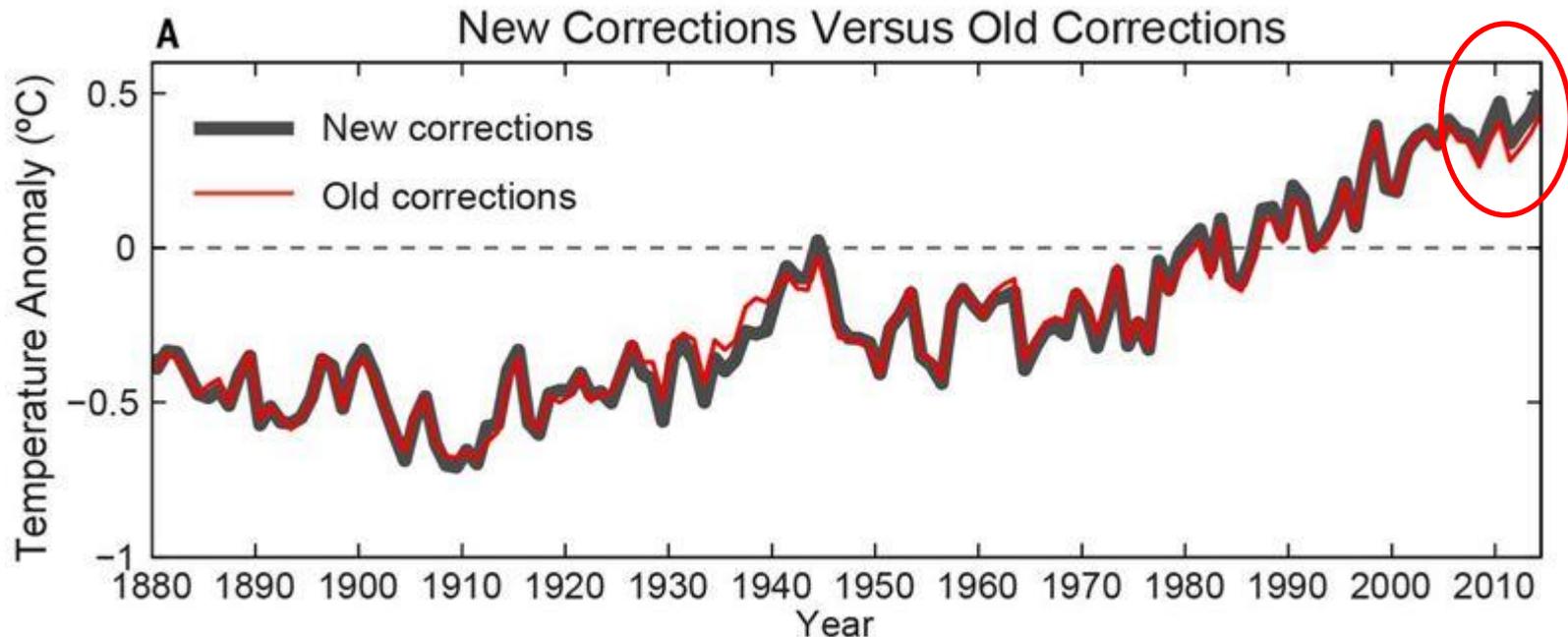
## Atténuation après 1998 ?

- Kosaka, Yu, et Shang-Ping Xie. 2013. « Recent Global-warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling ». *Nature* advance online publication (août 28). doi:10.1038/nature12534.
- Karl, Thomas R., Anthony Arguez, Boyin Huang, Jay H. Lawrimore, James R. McMahan, Matthew J. Menne, Thomas C. Peterson, Russell S. Vose, et Huai-Min Zhang. 2015. « Possible Artifacts of Data Biases in the Recent Global Surface Warming Hiatus ». *Science*, juin, aaa5632. doi:10.1126/science.aaa5632.



# Taux d'augmentation

- 1950-1999, 0,113°C /décade
- 2000-2014, 0,116°C /décade
- 1998-2014, 0,106°C /décade (sous estimation)



# Précipitations

- Augmentation de l'écart entre saisons sèches et humides :
  - Saisons des pluies plus humides (surtout dans les régions à fortes précipitations)
  - Moins de précipitations en saisons sèches (surtout dans les régions à climat sec)

Chou, Chia, John C. H. Chiang, Chia-Wei Lan, Chia-Hui Chung, Yi-Chun Liao, et Chia-Jung Lee. 2013. « Increase in the Range Between Wet and Dry Season Precipitation ». *Nature Geoscience* 6 (4) (avril): 263-267. doi:10.1038/NGEO1744.

- Australie, Brésil, Espagne, Portugal et Etats-Unis particulièrement vulnérables à des sécheresses répétées ; intensité supérieure aux évènements historiques

Jenkins, Katie, et Rachel Warren. 2014. « Quantifying the Impact of Climate Change on Drought Regimes Using the Standardised Precipitation Index ». *Theoretical and Applied Climatology* 120 (1-2): 41-54. doi:10.1007/s00704-014-1143-x.

- 1865:2005, bassin méditerranéen plus chaud et plus sec, tendance à l'augmentation des sécheresses

Mariotti, Annarita, Yutong Pan, Ning Zeng, et Andrea Alessandri. 2015. « Long-Term Climate Change in the Mediterranean Region in the Midst of Decadal Variability ». *Climate Dynamics* 44 (5-6): 1437-56. doi:10.1007/s00382-015-2487-3.

# Précipitations

- Augmentation de l'écart entre saisons sèches et humides :
  - Saisons des pluies plus humides (surtout dans les régions à fortes précipitations)
  - Moins de précipitations en saisons sèches (surtout dans les régions à climat sec)

Chou, Chia, John C. H. Chiang, Chia-Wei Lan, Chia-Hui Chung, Yi-Chun Liao, et Chia-Jung Lee. 2013. « Increase in the Range Between Wet and Dry Season Precipitation ». *Nature Geoscience* 6 (4) (avril): 263-267. doi:10.1038/NGEO1744.

- **Australie, Brésil, Espagne, Portugal et Etats-Unis particulièrement vulnérables à des sécheresses répétées ; intensité supérieure aux évènements historiques**

Jenkins, Katie, et Rachel Warren. 2014. « Quantifying the Impact of Climate Change on Drought Regimes Using the Standardised Precipitation Index ». *Theoretical and Applied Climatology* 120 (1-2): 41-54. doi:10.1007/s00704-014-1143-x.

- 1865:2005, bassin méditerranéen plus chaud et plus sec, tendance à l'augmentation des sécheresses

Mariotti, Annarita, Yutong Pan, Ning Zeng, et Andrea Alessandri. 2015. « Long-Term Climate Change in the Mediterranean Region in the Midst of Decadal Variability ». *Climate Dynamics* 44 (5-6): 1437-56. doi:10.1007/s00382-015-2487-3.

# Précipitations

## Précipitations :

- Augmentation de l'écart entre saisons sèches et humides :
  - Saisons des pluies plus humides (surtout dans les régions à fortes précipitations)
  - Moins de précipitations en saisons sèches (surtout dans les régions à climat sec)

Chou, Chia, John C. H. Chiang, Chia-Wei Lan, Chia-Hui Chung, Yi-Chun Liao, et Chia-Jung Lee. 2013. « Increase in the Range Between Wet and Dry Season Precipitation ». *Nature Geoscience* 6 (4) (avril): 263-267. doi:10.1038/NGEO1744.

- Australie, Brésil, Espagne, Portugal et Etats-Unis particulièrement vulnérables à des sécheresses répétées ; intensité supérieure aux évènements historiques

Jenkins, Katie, et Rachel Warren. 2014. « Quantifying the Impact of Climate Change on Drought Regimes Using the Standardised Precipitation Index ». *Theoretical and Applied Climatology* 120 (1-2): 41-54. doi:10.1007/s00704-014-1143-x.

- 1865:2005, bassin méditerranéen plus chaud et plus sec, tendance à l'augmentation des sécheresses

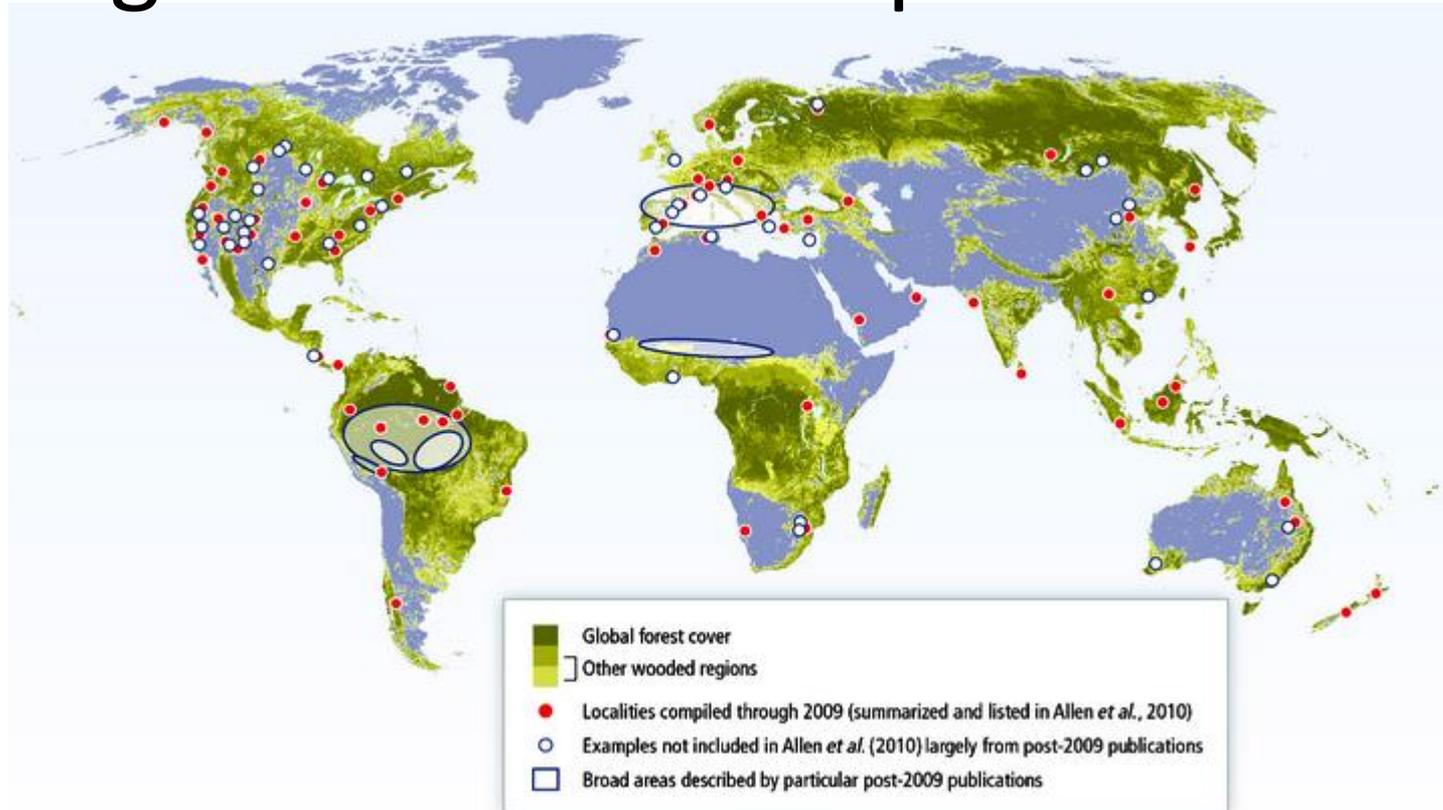
Mariotti, Annarita, Yutong Pan, Ning Zeng, et Andrea Alessandri. 2015. « Long-Term Climate Change in the Mediterranean Region in the Midst of Decadal Variability ». *Climate Dynamics* 44 (5-6): 1437-56. doi:10.1007/s00382-015-2487-3.

# Dépérissements forestiers



*Pinus ponderosa*, Patagonie, Argentine, 2011

# Signalements de dépérissements



- Hartmann, Henrik, Henry D. Adams, William R. L. Anderegg, Steven Jansen, et Melanie J. B. Zeppel. 2015. « Research Frontiers in Drought-Induced Tree Mortality: Crossing Scales and Disciplines ». *New Phytologist* 205 (3): 965-69.
- Allen, Craig D., Alison K. Macalady, Haroun Chenchouni, Dominique Bachelet, Nate McDowell, Michel Vennetier, Thomas Kitzberger, et al. 2010. « A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests ». *Forest Ecology and Management* 259 (4): 660-84.
- Settele J, Scholes R, Betts R, Bunn SE, Leadley P, Nepstad D, Overpeck JT, Taboada MA. 2014. Terrestrial and inland water systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 271–359.

# Principaux dépérissements récents

- Russie centrale, feux de forêts de 2010 : feux catastrophiques liés à une canicule exceptionnelle



# Principaux dépérissements récents

- Russie centrale, feux de forêts de 2010 : feux liés à une canicule exceptionnelle
- Nord-ouest de l'Amérique du Nord, à partir des années 2000 , infestation catastrophique d'insecte ravageur (petit scolyte *Dendroctonus ponderosae*, Dendroctone du pin ponderosa « Mountain pine beetle »,)



# Principaux dépérissements récents

- Russie centrale, feux de forêts de 2010 : feux liés à une canicule exceptionnelle
- Nord-ouest de l'Amérique du Nord, à partir des années 2000 , infestation catastrophique d'insecte ravageur (petit scolyte *Dendroctonus ponderosae*, Dendroctone du pin *ponderosa* « Mountain pine beetle »,)
- Tous deux sont liés au changement climatique

Klein, Tamir. 2015. « Drought-Induced Tree Mortality: From Discrete Observations to Comprehensive Research ». *Tree Physiology* 35 (3): 225-28. doi:10.1093/treephys/tpv029.

# Sécheresse, cause identifiée de dépérissements...

- ...de forêts tropicales d'Amazonie et de Bornéo

Phillips, Oliver L., Geertje van der Heijden, Simon L. Lewis, Gabriela López-González, Luiz E. O. C. Aragão, Jon Lloyd, Yadvinder Malhi, et al. 2010. « Drought–mortality Relationships for Tropical Forests ». *New Phytologist* 187 (3): 631-46.

- ...de forêts boréales du Canada

Peng, Changhui, Zihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71.

- ...du cyprès de la cordillère en Patagonie

Mundo, Ignacio A., Verónica A. El Mujtar, Marcelo H. Perdomo, Leonardo A. Gallo, Ricardo Villalba, et Marcelo D. Barrera. 2010. « Austrocedrus Chilensis Growth Decline in Relation to Drought Events in Northern Patagonia, Argentina ». *Trees* 24 (3): 561-70.

- ...du bouleau en Sibérie

Kharuk, V. I., K. J. Ranson, P. A. Oskorbin, S. T. Im, et M. L. Dvinskaya. 2013. « Climate Induced Birch Mortality in Trans-Baikal Lake Region, Siberia. » *Forest Ecology and Management* 289. doi:10.1016/j.

- ...du douglas et du sapin en France...

Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, et Nathalie Bréda. « Douglas-fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites ». *Annals of Forest Science* (2012): 1-12.

Cailleret, Maxime, Marie Nourtier, Annabelle Amm, Marion Durand-Gillmann, et Hendrik Davi. 2013. « Drought-Induced Decline and Mortality of Silver Fir Differ among Three Sites in Southern France ». *Annals of Forest Science* 71 (6): 643-57.

# Augmentation de la mortalité due à la sécheresse ?

- Oui dans l'ouest des Etats-Unis

Van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, et al. 2009. « Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States ». *Science* 323 (5913): 521-24. doi:10.1126/science.1165000.

- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

Peng, Changhui, Zihai Ma, Xiangdong Lei, Qiuhan Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71. doi:10.1038/nclimate1293.

- Globalement, oui également, mais faiblement et plutôt en climats secs

Steinkamp, Jörg, et Thomas Hickler. 2015. « Is Drought-Induced Forest Dieback Globally Increasing? ». *Journal of Ecology* 103 (1): 31-43. doi:10.1111/1365-2745.12335.

# Augmentation de la mortalité due à la sécheresse ?

- Oui dans l'ouest des Etats-Unis

Van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, et al. 2009. « Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States ». *Science* 323 (5913): 521-24. doi:10.1126/science.1165000.

- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

Peng, Changhui, Zhihai Ma, Xiangdong Lei, Qiuhan Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71. doi:10.1038/nclimate1293.

- Globalement, oui également, mais faiblement et plutôt en climats secs

Steinkamp, Jörg, et Thomas Hickler. 2015. « Is Drought-Induced Forest Dieback Globally Increasing? ». *Journal of Ecology* 103 (1): 31-43. doi:10.1111/1365-2745.12335.

# Augmentation de la mortalité due à la sécheresse ?

- Oui dans l'ouest des Etats-Unis

Van Mantgem, P. J., N. L. Stephenson, J. C. Byrne, L. D. Daniels, J. F. Franklin, P. Z. Fule, M. E. Harmon, et al. 2009. « Widespread Increase of Tree Mortality Rates in the Western United States ». *Science* 323 (5913): 521-24. doi:10.1126/science.1165000.

- Oui au Canada : augmentation de la mortalité de 4,7% par an de 1963 à 2008 (4.9% dans l'ouest et 1.9% dans l'est)

Peng, Changhui, Zihai Ma, Xiangdong Lei, Qian Zhu, Huai Chen, Weifeng Wang, Shirong Liu, Weizhong Li, Xiuqin Fang, et Xiaolu Zhou. 2011. « A Drought-Induced Pervasive Increase in Tree Mortality across Canada's Boreal Forests ». *Nature Climate Change* 1 (9): 467-71. doi:10.1038/nclimate1293.

- Globalement : oui également, mais faiblement et plutôt en climats secs

Steinkamp, Jörg, et Thomas Hickler. 2015. « Is Drought-Induced Forest Dieback Globally Increasing? ». *Journal of Ecology* 103 (1): 31-43. doi:10.1111/1365-2745.12335.

# Sécheresse = précipitations ou température ?

- Forêts feuillues nord-américaines : réponse homogène à la sécheresse, plutôt liée aux faibles précipitations au nord, et aux hautes températures au sud

Martin-Benito, Dario, et Neil Pederson. 2015. « Convergence in Drought Stress, but a Divergence of Climatic Drivers across a Latitudinal Gradient in a Temperate Broadleaf Forest ». *Journal of Biogeography* 42 (5): 925-37. doi:10.1111/jbi.12462.



# Caractéristiques des épisodes de mortalité

- Augmentation du nombre d'observations
- Tous climats concernés
- Augmentation du taux de mortalité : plutôt en climats secs
- Dispersés ou massifs
- En plantations aussi bien que peuplements naturels
- Pour des espèces introduites aussi bien que des espèces autochtones

# Forêts, puits de carbone

- Capture et stockage temporaire du carbone
  - Arbres sur pied : augmentation des surfaces plantées
  - Utilisation du bois : mis en œuvre de façon durable



# Puits ou sources de C, atténuation ou emballement ?

- Forêts amazoniennes : vulnérables au stress hydrique, risquent de libérer du carbone qui pourrait accentuer le changement climatique

Phillips, Oliver L., Luiz E. O. C. Aragão, Simon L. Lewis, Joshua B. Fisher, Jon Lloyd, Gabriela López-González, Yadvinder Malhi, et al. « Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest ». *Science* 323, n° 5919 (3 juin 2009): 1344-1347. doi:10.1126/science.1164033.

- Les forêts tempérées et boréales de l'ouest canadien pourraient devenir des sources de carbone si les sécheresses associées au changement climatique continuent de s'intensifier

Zhang, Yao, Changhui Peng, Weizhong Li, Xiuqin Fang, Tinglong Zhang, Qian Zhu, Huai Chen, et Pengxiang Zhao. 2013. « Monitoring and estimating drought-induced impacts on forest structure, growth, function, and ecosystem services using remote-sensing data: recent progress and future challenges ». *Environmental Reviews* 21 (2) (avril 19): 103-115. doi:10.1139/er-2013-0006.

Ma, Zhihai, Changhui Peng, Qian Zhu, Huai Chen, Guirui Yu, Weizhong Li, Xiaolu Zhou, Weifeng Wang, et Wenhua Zhang. 2012. « Regional Drought-Induced Reduction in the Biomass Carbon Sink of Canada's Boreal Forests ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (7): 2423-27. doi:10.1073/pnas.1111576109.

# Puits ou sources de C, atténuation ou emballement ?

- Les forêts amazoniennes sont vulnérables au stress hydrique et risquent de libérer du carbone qui pourrait accentuer le changement climatique

Phillips, Oliver L., Luiz E. O. C. Aragão, Simon L. Lewis, Joshua B. Fisher, Jon Lloyd, Gabriela López-González, Yadvinder Malhi, et al. « Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest ». *Science* 323, n° 5919 (3 juin 2009): 1344-1347. doi:10.1126/science.1164033.

- Forêts tempérées et boréales de l'ouest canadien : pourraient devenir des sources de carbone si les sécheresses associées au changement climatique continuent de s'intensifier

Zhang, Yao, Changhui Peng, Weizhong Li, Xiuqin Fang, Tinglong Zhang, Qian Zhu, Huai Chen, et Pengxiang Zhao. 2013. « Monitoring and estimating drought-induced impacts on forest structure, growth, function, and ecosystem services using remote-sensing data: recent progress and future challenges ». *Environmental Reviews* 21 (2) (avril 19): 103-115. doi:10.1139/er-2013-0006.

Ma, Zhihai, Changhui Peng, Qian Zhu, Huai Chen, Guirui Yu, Weizhong Li, Xiaolu Zhou, Weifeng Wang, et Wenhua Zhang. 2012. « Regional Drought-Induced Reduction in the Biomass Carbon Sink of Canada's Boreal Forests ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (7): 2423-27. doi:10.1073/pnas.1111576109.

# Le reboisement aggrave-t-il le réchauffement global ?

- Des effets antagonistes : stockage du carbone et évapotranspiration refroidissent, l'effet albédo réchauffe...
  - Hémisphère sud, l'augmentation des surfaces plantées aggrave le réchauffement

Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Zhaomin Wang. 2015. « Global warming caused by afforestation in the Southern Hemisphere ». *Ecological Indicators* 52 (mai): 371-78.  
doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.004.

- Norvège

De Wit, Heleen A., et Glen P. Peters. 2014. « Climate Change: Albedo Dominates ». *Global Change Biology* 20 (12): 3711-21.  
doi:10.1111/gcb.12444

- Bilan observé

- Réchauffement
- Refroidissement faible

Li, Yan, Maosheng Wang, et Shuangcheng Li. 2015. « Local Cooling by Afforestation in the Southern Hemisphere ». *Nature Communications* 6 (1): 1-6.



nt dominant

a M. Kvalevåg, et Glen P.  
xpansion: Reduced  
55.

s en hiver

, forêts boréales

et Shuangcheng Li.  
bservations ». *Nature*

# Le reboisement aggrave-t-il le réchauffement global ?

- Des effets antagonistes : stockage du carbone et évapotranspiration refroidissent, l'effet albédo réchauffe...
  - Hémisphère sud, l'augmentation des surfaces plantées aggrave le réchauffement

Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Zhaomin Wang. 2015. « Global warming caused by afforestation in the Southern Hemisphere ». *Ecological Indicators* 52 (mai): 371-78.  
doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.004.

- Norvège, des simulations prédisent un effet réchauffement dominant

De Wit, Heleen A., Anders Bryn, Annika Hofgaard, Jonas Karstensen, Maria M. Kvalevåg, et Glen P. Peters. 2014. « Climate Warming Feedback from Mountain Birch Forest Expansion: Reduced Albedo Dominates Carbon Uptake ». *Global Change Biology* 20 (7): 2344-55.  
doi:10.1111/gcb.12483.

- Bilan observé par satellite :
  - Réchauffement : forêts tempérées et surtout forêts boréales en hiver
  - Refroidissement : forêts tropicales, forêts tempérées en été, forêts boréales faiblement en été

Li, Yan, Maosheng Zhao, Safa Motesharrei, Qiaozhen Mu, Eugenia Kalnay, et Shuangcheng Li. 2015. « Local Cooling and Warming Effects of Forests Based on Satellite Observations ». *Nature Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1038/ncomms7603.

# Le reboisement aggrave-t-il le réchauffement global ?

- Des effets antagonistes : stockage du carbone et évapotranspiration refroidissent, l'effet albédo réchauffe...
  - Hémisphère sud, l'augmentation des surfaces plantées aggrave le réchauffement

Wang, Ye, Xiaodong Yan, et Zhaomin Wang. 2015. « Global warming caused by afforestation in the Southern Hemisphere ». *Ecological Indicators* 52 (mai): 371-78.  
doi:10.1016/j.ecolind.2014.12.004.

- Norvège, des simulations prédisent un effet réchauffement dominant

De Wit, Heleen A., Anders Bryn, Annika Hofgaard, Jonas Karstensen, Maria M. Kvalevåg, et Glen P. Peters. 2014. « Climate Warming Feedback from Mountain Birch Forest Expansion: Reduced Albedo Dominates Carbon Uptake ». *Global Change Biology* 20 (7): 2344-55.  
doi:10.1111/gcb.12483.

- Bilan observé par satellite :
  - Réchauffement : forêts tempérées et surtout forêts boréales en hiver
  - Refroidissement : forêts tropicales, forêts tempérées en été, forêts boréales faiblement en été

Li, Yan, Maosheng Zhao, Safa Motesharrei, Qiaozhen Mu, Eugenia Kalnay, et Shuangcheng Li. 2015. « Local Cooling and Warming Effects of Forests Based on Satellite Observations ». *Nature Communications* 6 (mars): 6603. doi:10.1038/ncomms7603.

# Mortalités ...partie visible de la modification des aires naturelles ?

- Déplacements

- Vers des latitudes plus élevées : difficile à mettre en évidence

Hanberry, Brice B., et Mark H. Hansen. 2015. « Latitudinal range shifts of tree species in the United States across multi-decadal time scales ». *Basic and Applied Ecology* 16 (3): 231-38. doi:10.1016/j.baae.2015.02.002.

- Vers des altitudes plus élevées : observés

Lenoir, J., J. C. Gégout, P. A. Marquet, P. de Ruffray, et H. Brisse. 2008. « A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century ». *Science* 320 (5884): 1768-71. doi:10.1126/science.1156831.

- Nombreuses simulations (*Quercus ilex*, *Fagus sylvatica*)

- Globalement (projet CARBOFOR)
- Tenant compte de la variation intra espèce

Kramer, Koen, Bernd Degen, Jutta Buschbom, Thomas Hickler, Wilfried Thuiller, Martin T. Sykes, et Wim de Winter. « Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change—Range, abundance, genetic diversity and adaptive response ». *Forest Ecology and Management* 259, n° 11

# Mortalités ...partie visible de la modification des aires naturelles ?

- Déplacements

- Vers des latitudes plus élevées : difficile à mettre en évidence

- Hanberry, Brice B., et Mark H. Hansen. 2015. « Latitudinal range shifts of tree species in the United States across multi-decadal time scales ». *Basic and Applied Ecology* 16 (3): 231-38. doi:10.1016/j.baae.2015.02.002.

- Vers des altitudes plus élevées : observés

- Lenoir, J., J. C. Gégout, P. A. Marquet, P. de Ruffray, et H. Brisse. 2008. « A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century ». *Science* 320 (5884): 1768-71. doi:10.1126/science.1156831.

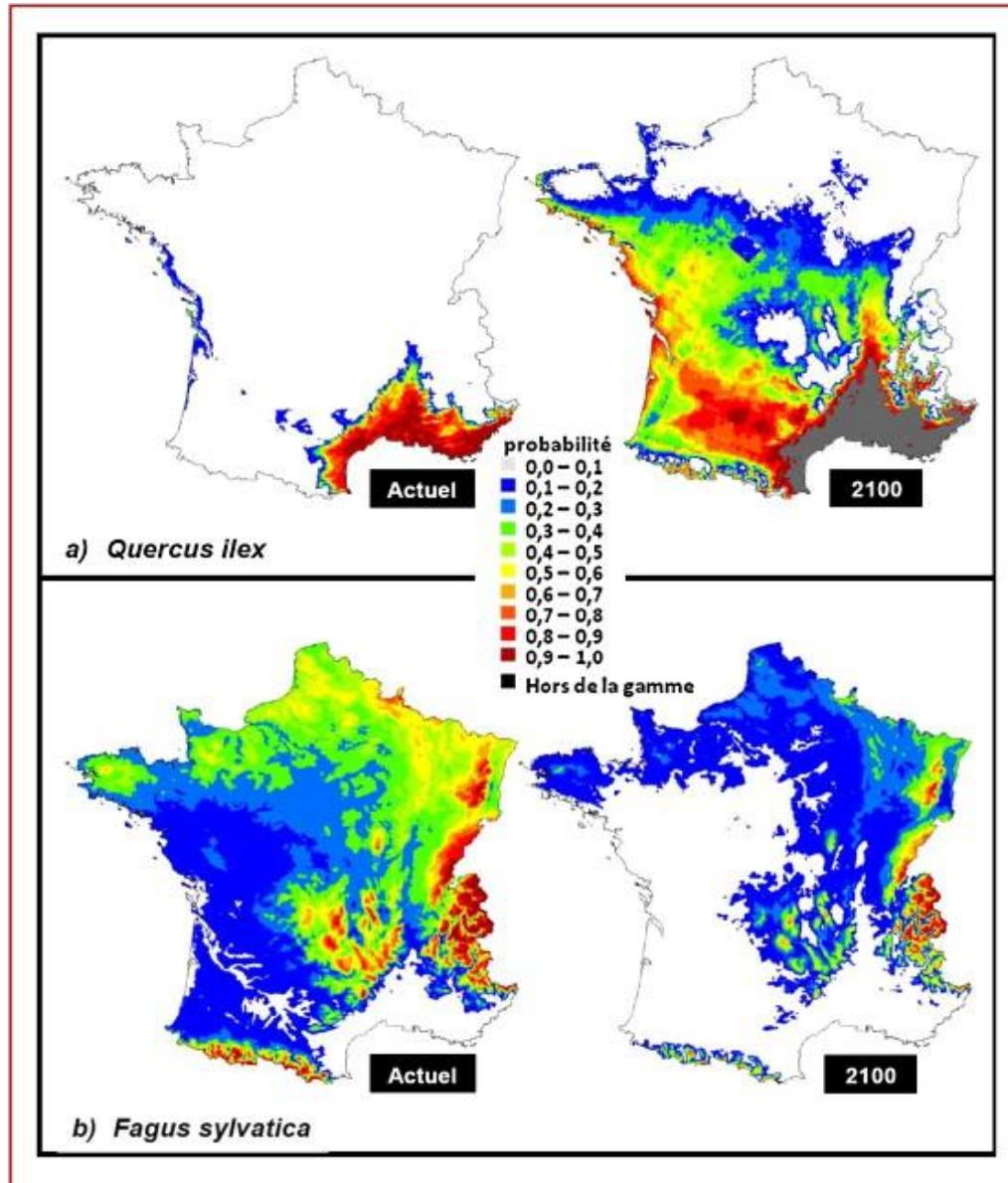
- Nombreuses simulations (*Quercus ilex*, *Fagus sylvatica*)

- Globalement (projet CARBOFOR)

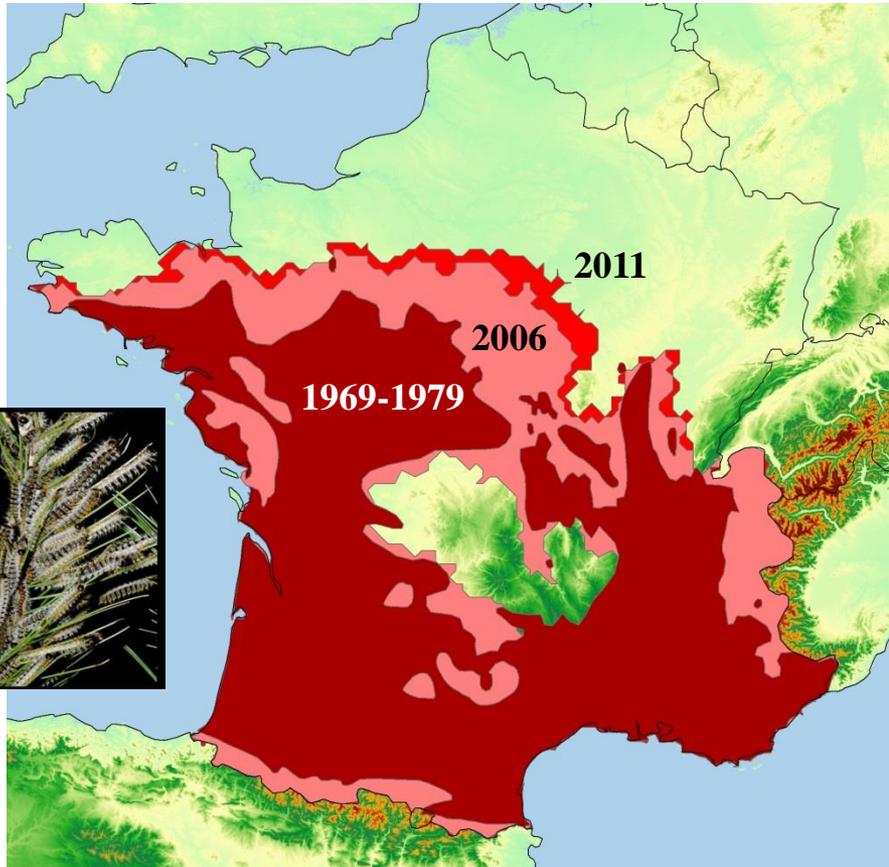
- Tenant compte de la variation intra espèce

- Kramer, Koen, Bernd Degen, Jutta Buschbom, Thomas Hickler, Wilfried Thuiller, Martin T. Sykes, et Wim de Winter. « Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change—Range, abundance, genetic diversity and adaptive response ». *Forest Ecology and Management* 259, n° 11

# Exemple : simulations « Carbofor »



# Expansion d'aires de ravageurs



- Processionnaire du pin  
*Thaumetopoea pityocampa*
- Insecte urticant
- Augmentation de l'aire de distribution



Rousselet J., R. Zhao, D. Argal, M. Simonato, A. Battisti, A. Roques & C. Kerdelhué, 2010. The role of topography in structuring the demographic history of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* (Lepidoptera: Notodontidae). *Journal of Biogeography*, 37(8): 1478-1490.



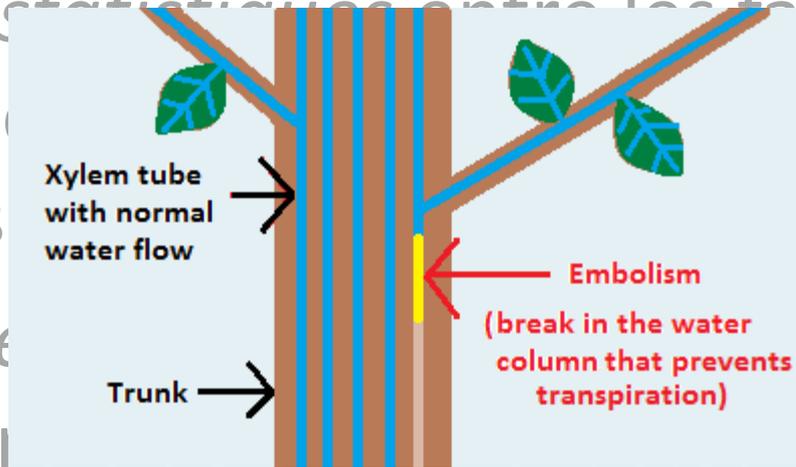
# Comment identifier les causes des dépérissements ?

- *Relations statistiques* entre les facteurs supposés et les caractères adaptatifs (par exemple sécheresse et survie)
- Expériences *en conditions contrôlées* pour valider le rôle de certains facteurs
- Connaissances *biologiques* impliquées



# Comment identifier les causes des dépérissements ?

- Relations statistiques entre les facteurs supposés causatifs (par exemple sècheresse)
- Expériences contrôlées pour valider le rôle des facteurs
- Connaissance des mécanismes physiologiques impliqués



(<https://researchraves.files.wordpress.com/2013/03/xylem-embolism-image.png>)

# Mécanisme physiologique de la mortalité liée à la sécheresse

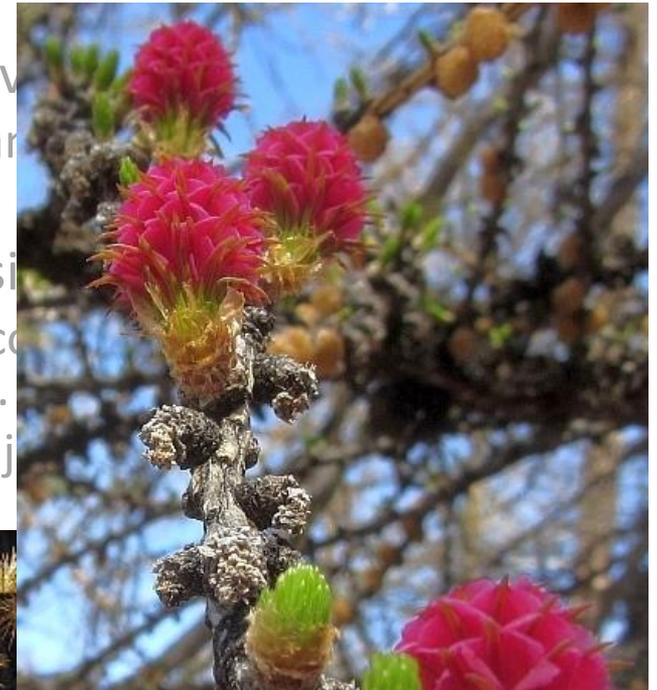
- Mourir de faim ou de soif ? Débat en cours
- Chez *Picea abies* “la soif intervient avant la faim”

Hartmann, Henrik, Waldemar Ziegler, Olaf Kolle, et Susan Trumbore. « Thirst Beats Hunger – Declining Hydration During Drought Prevents Carbon Starvation in Norway Spruce Saplings ». *New Phytologist* (2013): n/a–n/a. doi:10.1111/nph.12331.

# Effets sur la phénologie



-10 : saison de v  
e : 4,7 jours/10 an  
,6 jours/10 ans  
u nord et Eurasi  
e début plus préc  
2,2 jours/10 ans.  
s précoce de 2,7 j  
0 ans.



0.6 jours / 10

eni, et Laurent Li. 2015.  
uptly over the Last  
289.



H  
04  
•  
W  
«  
TH

# Effets sur la phénologie

- Hautes latitudes nord 2000–10 : saison de végétation plus longue
  - Date de début plus précoce : 4,7 jours/10 ans
  - Date de fin plus tardive : 1,6 jours/10 ans
- Des différences Amérique du nord et Eurasie
  - Amérique du nord, date de début plus précoce de 11,5 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 2,2 jours/10 ans.
  - Eurasie, date de début plus précoce de 2,7 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 3,5 jours/10 ans.

Zeng, Heqing, Gensuo Jia, et Howard Epstein. 2011. « Recent Changes in Phenology over the Northern High Latitudes Detected from Multi-satellite Data ». *Environmental Research Letters* 6 (4) (janvier 1): 045508. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045508.

- 1982–2011, en moyenne à l'échelle mondiale  $-1.4 \pm 0.6$  jours / 10 ans.

Wang, Xuhui, Shilong Piao, Xiangtao Xu, Philippe Ciais, Natasha MacBean, Ranga B. Myneni, et Laurent Li. 2015. « Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-up Slowed down or Changed Abruptly over the Last Three Decades? ». *Global Ecology and Biogeography* 24 (6): 621-31. doi:10.1111/geb.12289.

# Effets sur la phénologie

- Hautes latitudes nord 2000–10 : saison de végétation plus longue
  - Date de début plus précoce : 4,7 jours/10 ans
  - Date de fin plus tardive : 1,6 jours/10 ans
- Des différences Amérique du nord et Eurasie
  - Amérique du nord, date de début plus précoce de **11,5** jours/10 ans, date de fin plus tardive de **2,2** jours/10 ans.
  - Eurasie, date de début plus précoce de **2,7** jours/10 ans, date de fin plus tardive de **3,5** jours/10 ans.

Zeng, Heqing, Gensuo Jia, et Howard Epstein. 2011. « Recent Changes in Phenology over the Northern High Latitudes Detected from Multi-satellite Data ». *Environmental Research Letters* 6 (4) (janvier 1): 045508. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045508.

- 1982–2011, en moyenne à l'échelle mondiale  $-1.4 \pm 0.6$  jours / 10 ans.

Wang, Xuhui, Shilong Piao, Xiangtao Xu, Philippe Ciais, Natasha MacBean, Ranga B. Myneni, et Laurent Li. 2015. « Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-up Slowed down or Changed Abruptly over the Last Three Decades? ». *Global Ecology and Biogeography* 24 (6): 621-31. doi:10.1111/geb.12289.

# Effets sur la phénologie

- Hautes latitudes nord 2000–10 : saison de végétation plus longue
  - Date de début plus précoce : 4,7 jours/10 ans
  - Date de fin plus tardive : 1,6 jours/10 ans
- Des différences Amérique du nord et Eurasie
  - Amérique du nord, date de début plus précoce de 11,5 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 2,2 jours/10 ans.
  - Eurasie, date de début plus précoce de 2,7 jours/10 ans, date de fin plus tardive de 3,5 jours/10 ans.

Zeng, Heqing, Gensuo Jia, et Howard Epstein. 2011. « Recent Changes in Phenology over the Northern High Latitudes Detected from Multi-satellite Data ». *Environmental Research Letters* 6 (4) (janvier 1): 045508. doi:10.1088/1748-9326/6/4/045508.

- **1982–2011, en moyenne à l'échelle mondiale  $-1.4 \pm 0.6$  jours / 10 ans.**

Wang, Xuhui, Shilong Piao, Xiangtao Xu, Philippe Ciais, Natasha MacBean, Ranga B. Myneni, et Laurent Li. 2015. « Has the Advancing Onset of Spring Vegetation Green-up Slowed down or Changed Abruptly over the Last Three Decades? ». *Global Ecology and Biogeography* 24 (6): 621-31. doi:10.1111/geb.12289.

# Effets sur la croissance

- Forêts boréales du Canada
  - Augmentation de la croissance aux hautes latitudes (températures plus élevées = conditions de croissance améliorées)
  - Peu de modifications aux latitudes plus basses (températures plus élevées = selon les moments et les endroits, conditions de croissance améliorées ou sécheresse accentuée)

Huang, Jian-Guo, Yves Bergeron, Frank Berninger, Lihong Zhai, Jacques C. Tardif, et Bernhard Denneler. 2013. « Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest ». *Plos One* 8 (2) (février 28). doi:10.1371/journal.pone.0056758.

- Sapin en Europe ; régions tempérées : croissance augmentée, sud-ouest de l'Europe : croissance diminuée,

Gazol, Antonio, J. Julio Camarero, Emilia Gutiérrez, Ionel Popa, Laia Andreu-Hayles, Renzo Motta, Paola Nola, et al. 2015. « Distinct Effects of Climate Warming on Populations of Silver Fir (*Abies Alba*) across Europe ». *Journal of Biogeography* 42 (6): 1150-62. doi:10.1111/jbi.12512.

# Effets sur la croissance

- Forêts boréales du Canada
  - Augmentation de la croissance aux hautes latitudes (températures plus élevées = conditions de croissance améliorées)
  - Peu de modifications aux latitudes plus basses (températures plus élevées = selon les moments et les endroits, conditions de croissance améliorées ou sécheresse accentuée)

Huang, Jian-Guo, Yves Bergeron, Frank Berninger, Lihong Zhai, Jacques C. Tardif, et Bernhard Denneler. 2013. « Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest ». *Plos One* 8 (2) (février 28). doi:10.1371/journal.pone.0056758.

- Sapin en Europe ; régions tempérées : croissance augmentée, sud-ouest de l'Europe : croissance diminuée,

Gazol, Antonio, J. Julio Camarero, Emilia Gutiérrez, Ionel Popa, Laia Andreu-Hayles, Renzo Motta, Paola Nola, et al. 2015. « Distinct Effects of Climate Warming on Populations of Silver Fir (*Abies Alba*) across Europe ». *Journal of Biogeography* 42 (6): 1150-62. doi:10.1111/jbi.12512.

# Effets sur la croissance

- Forêts mélangés de conifères dans les Cascades en Amérique du Nord : croissance augmentée par des hivers plus doux, survie diminuée par l'augmentation de l'intensité des incendies

Bigelow, Seth W., Michael J. Papaik, Caroline Caum, et Malcolm P. North. 2014. « Faster Growth in Warmer Winters for Large Trees in a Mediterranean-Climate Ecosystem ». *Climatic Change* 123 (2): 215-24. doi:10.1007/s10584-014-1060-0.

- Forêts boréales de Finlande : augmentation significative surtout depuis 1990. Une augmentation supplémentaire due à d'autres raisons (sylviculture, déport d'azote et/ou concentration en CO<sub>2</sub>)

Kauppi, Pekka E., Maximilian Posch, et Pentti Pirinen. 2014. « Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960 ». *Plos One* 9 (11): e111340. doi:10.1371/journal.pone.0111340.

# Effets sur la croissance

- Forêts mélangés de conifères dans les Cascades en Amérique du Nord : croissance augmentée par des hivers plus doux, survie diminuée par l'augmentation de l'intensité des incendies

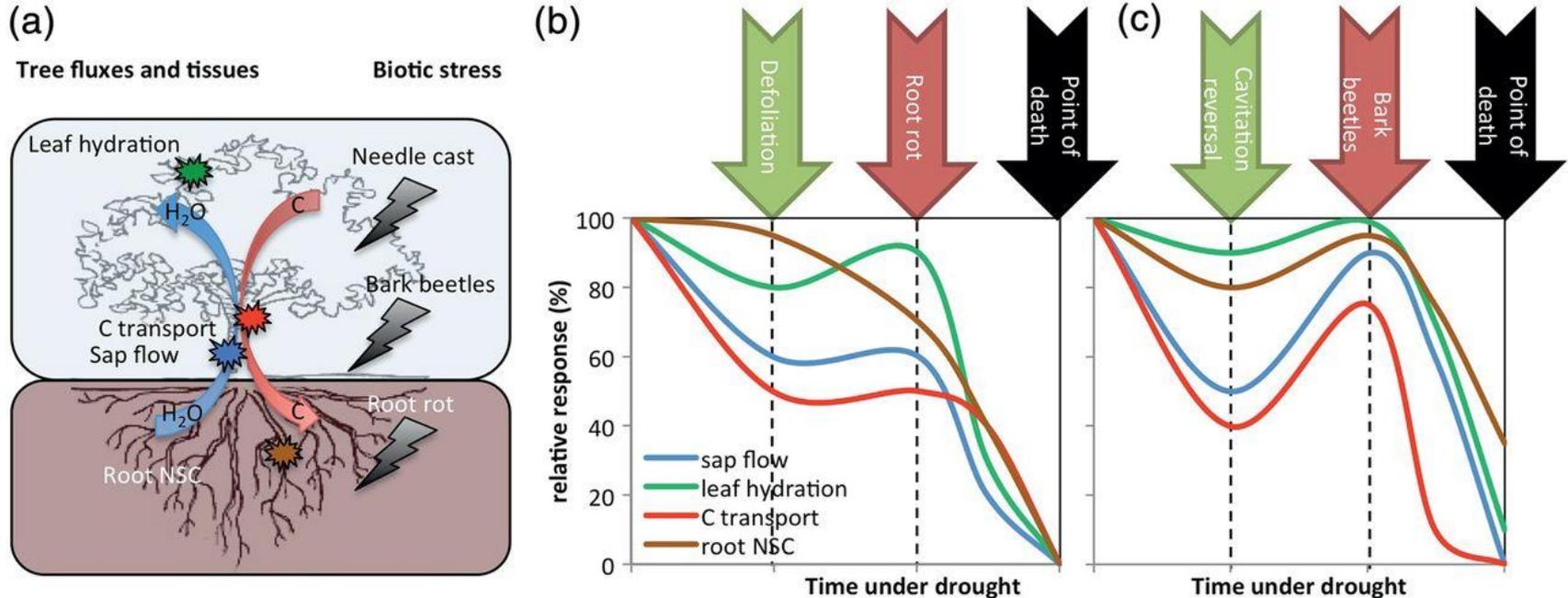
Bigelow, Seth W., Michael J. Papaik, Caroline Caum, et Malcolm P. North. 2014. « Faster Growth in Warmer Winters for Large Trees in a Mediterranean-Climate Ecosystem ». *Climatic Change* 123 (2): 215-24. doi:10.1007/s10584-014-1060-0.

- Forêts boréales de Finlande : augmentation significative surtout depuis 1990. Une augmentation supplémentaire due à d'autres raisons (sylviculture, apport d'azote et/ou concentration en CO<sub>2</sub>)

Kauppi, Pekka E., Maximilian Posch, et Pentti Pirinen. 2014. « Large Impacts of Climatic Warming on Growth of Boreal Forests since 1960 ». *Plos One* 9 (11): e111340. doi:10.1371/journal.pone.0111340.

# Causes des dépérissements

- Sécheresses (précipitation et/ou température)
- Attaques de ravageurs
- Combinaisons de facteurs (Klein and Way 2015)



# Adaptation au changement climatique

- Mécanisme naturel : ajustement des organismes aux variations de leur environnement
- Adaptation assistée par l'homme : profiter du potentiel naturel pour accélérer et renforcer cet ajustement
- Le rôle de la recherche : exemple sur une espèce modèle, le douglas

# Adaptation au changement climatique

- Mécanisme naturel : ajustement des organismes aux variations de leur environnement
- Adaptation assistée par l'homme : profiter du potentiel naturel pour accélérer et renforcer cet ajustement
- Le rôle de la recherche : exemple sur une espèce modèle, le douglas

# Adaptation au changement climatique

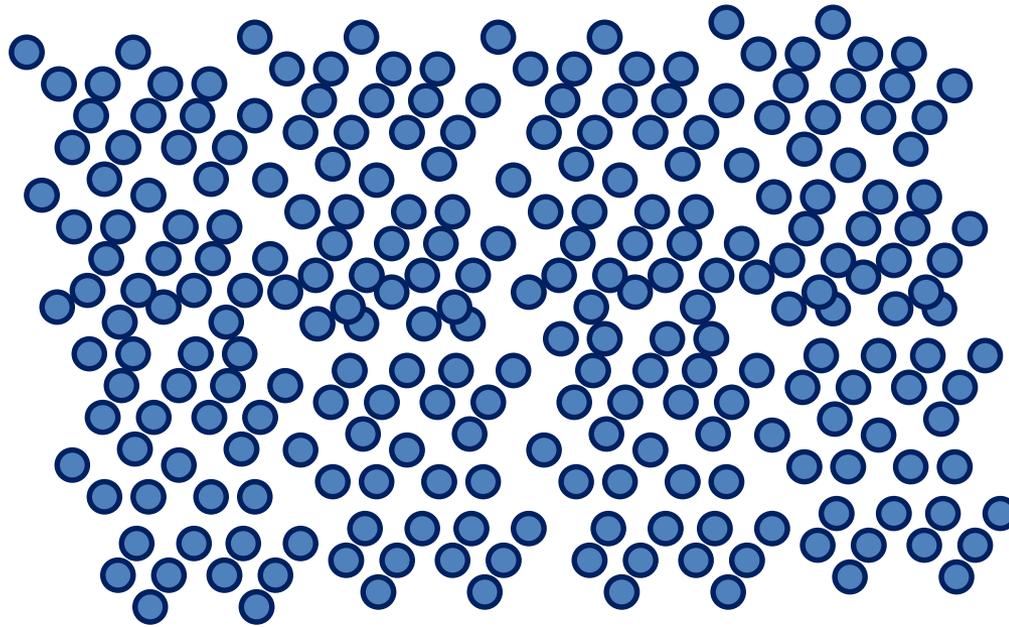
- Mécanismes  
organismes  
environnementaux
- Adaptation  
potentielle  
cet ajustement



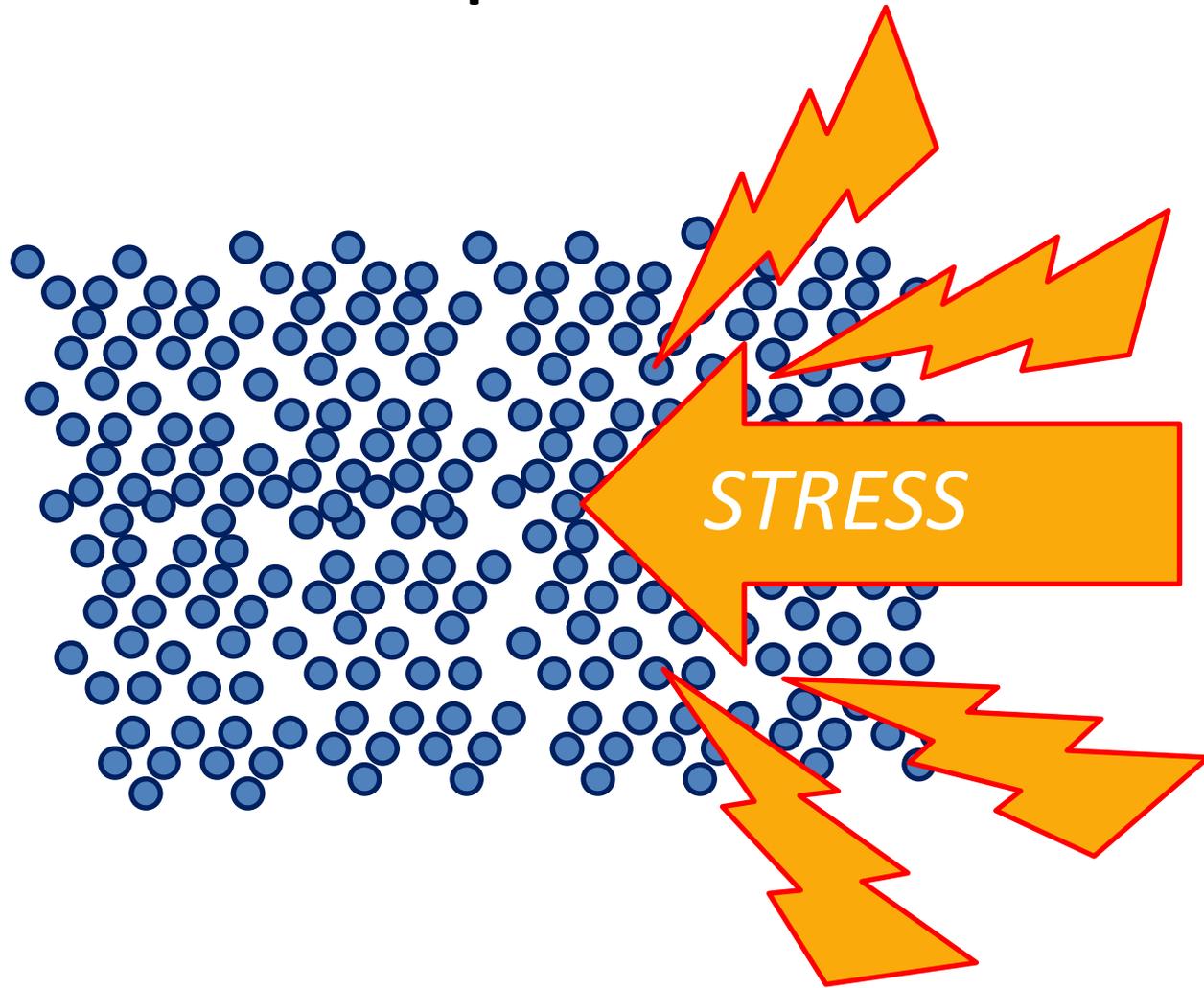
- Le rôle de la recherche : exemple sur une espèce modèle, le douglas

profiter du  
renforcer

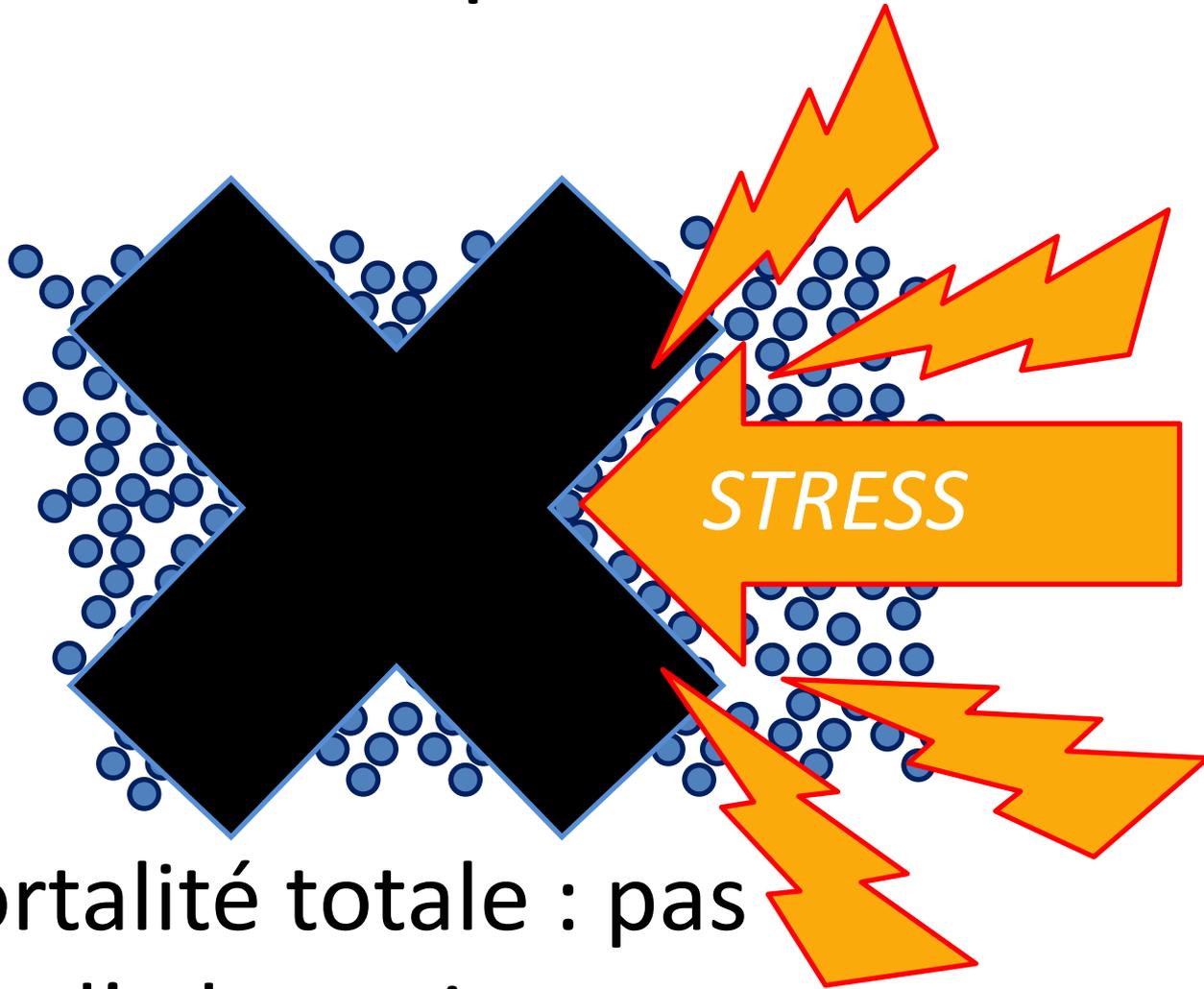
# Adaptation



# Adaptation

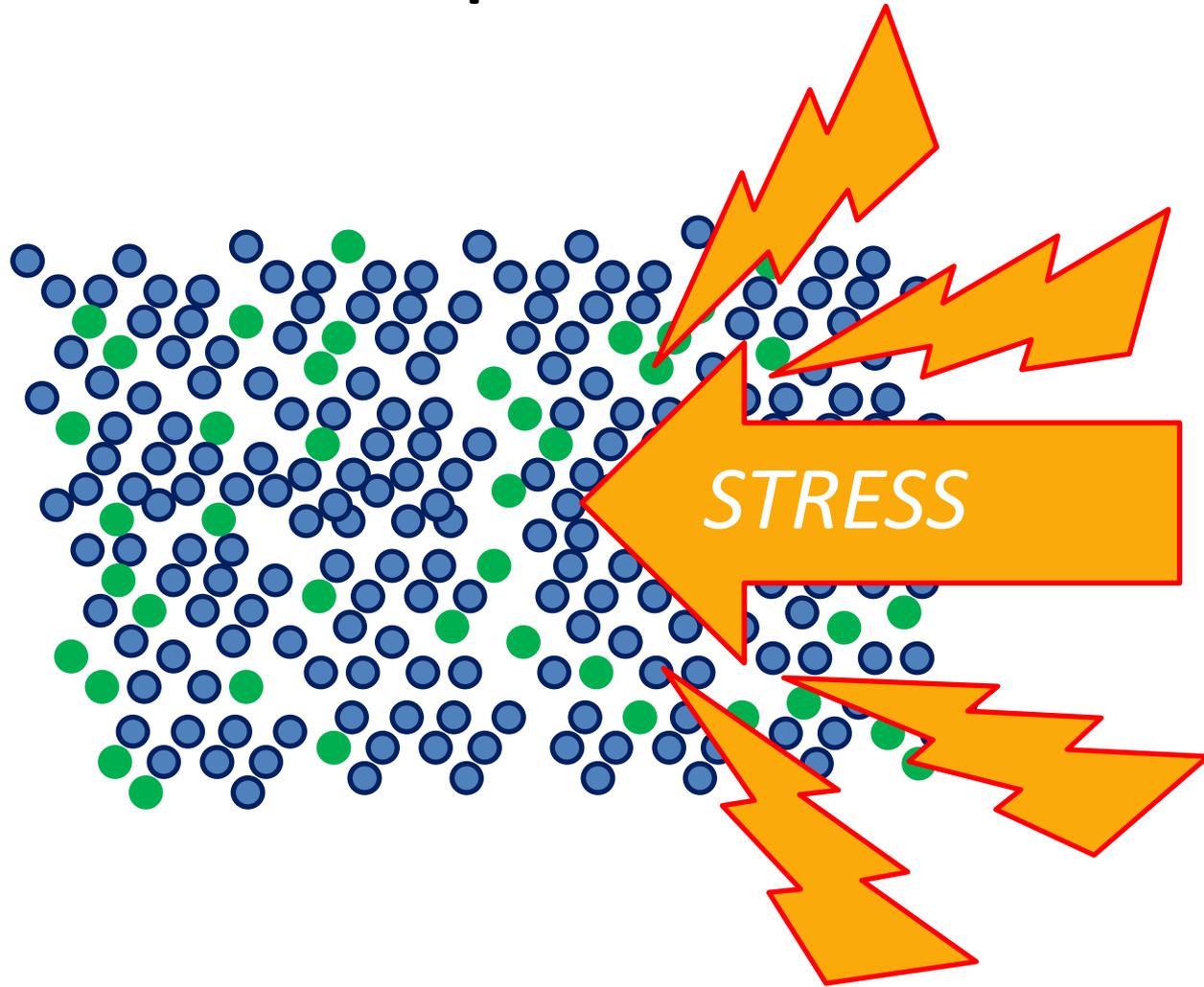


# Adaptation

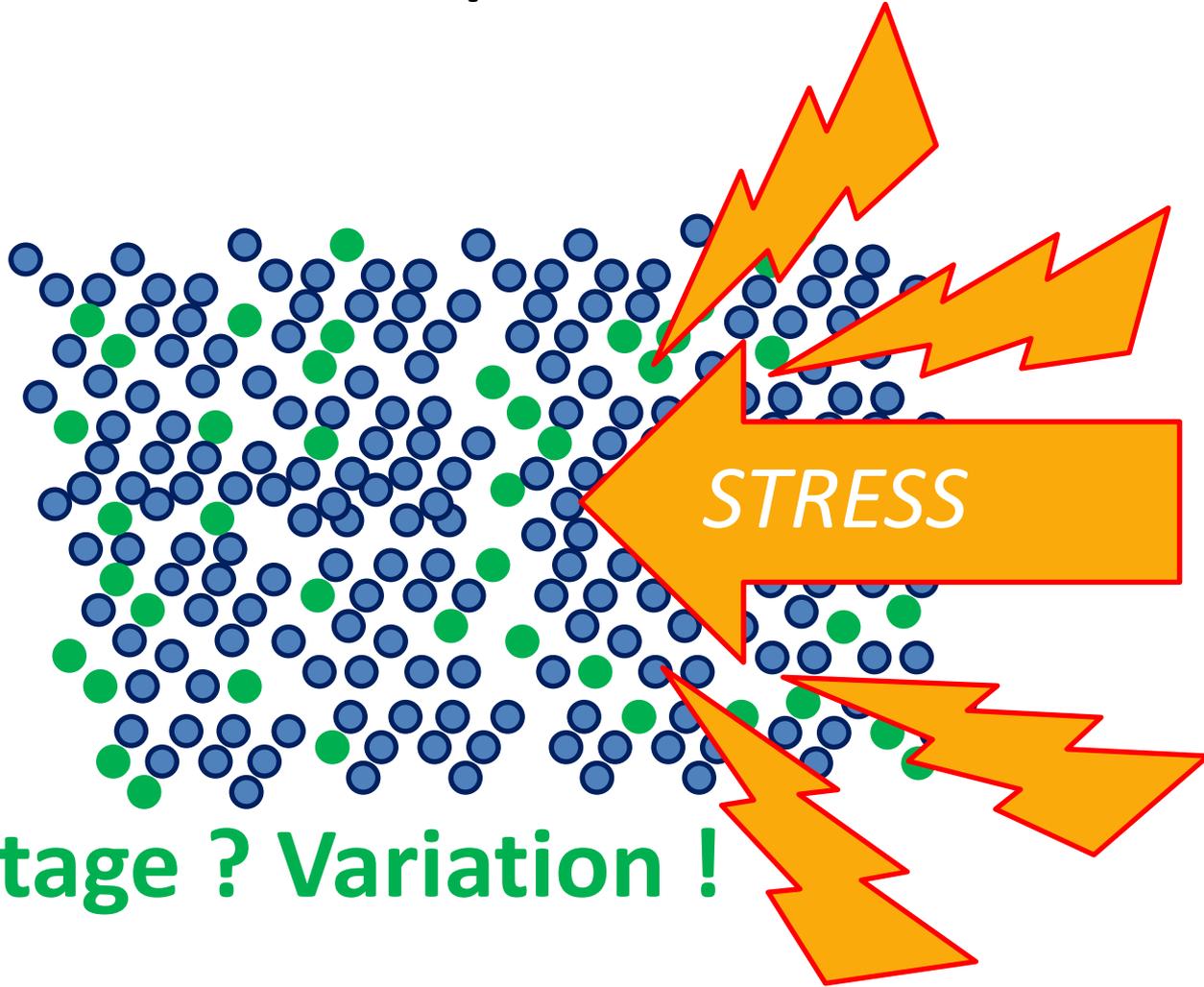


Mortalité totale : pas  
d'adaptation

# Adaptation

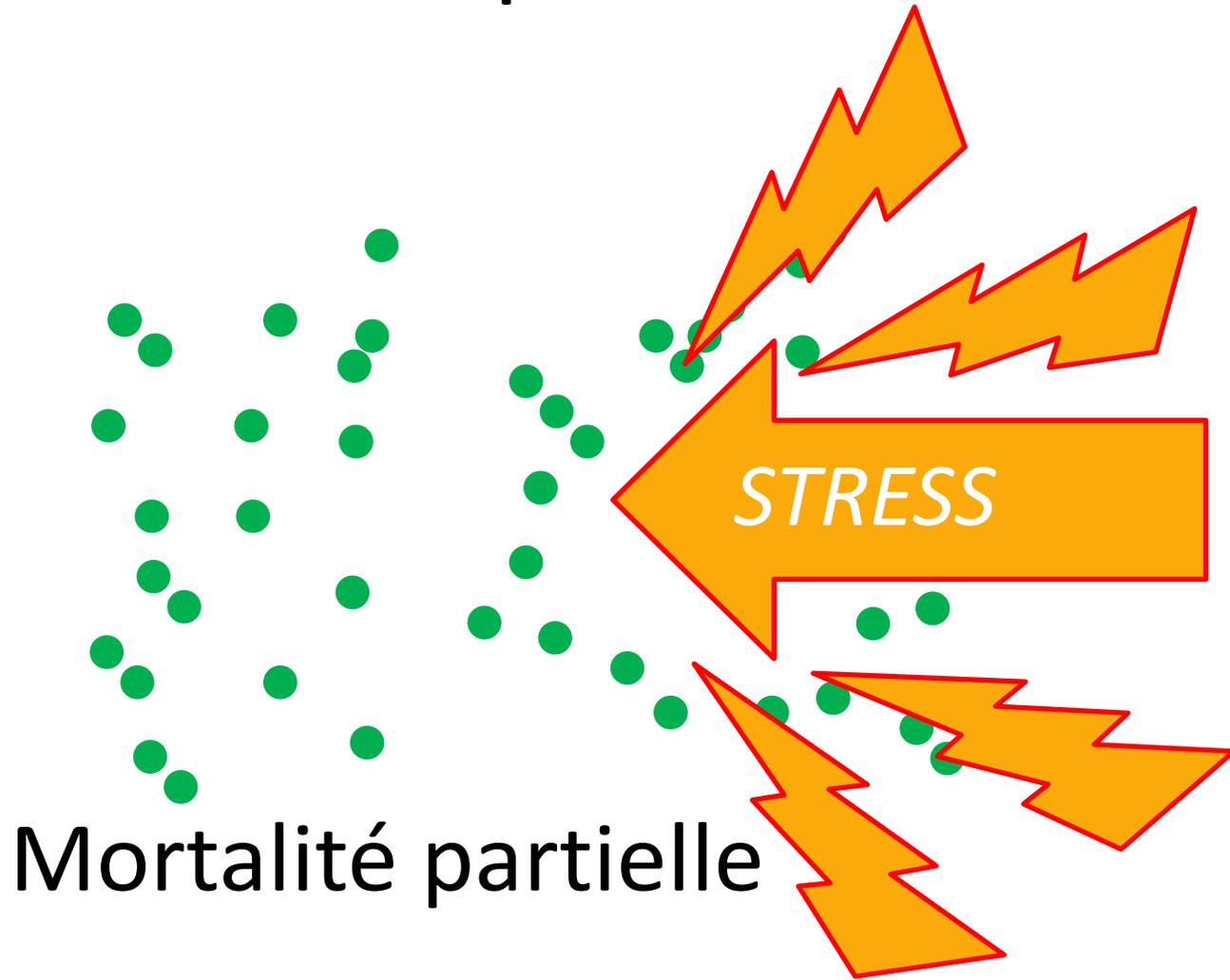


# Adaptation



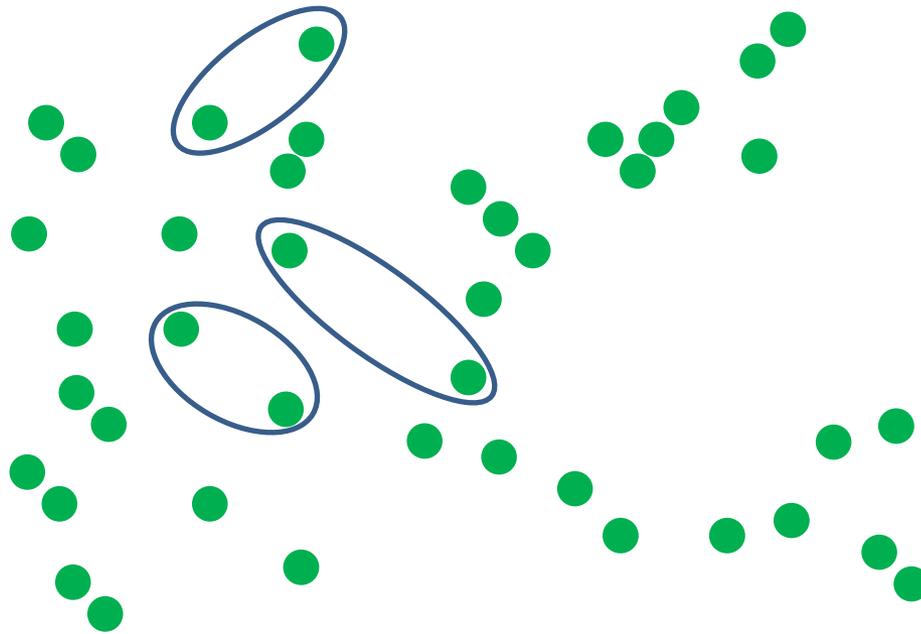
**Avantage ? Variation !**

# Adaptation



Mortalité partielle

# Adaptation



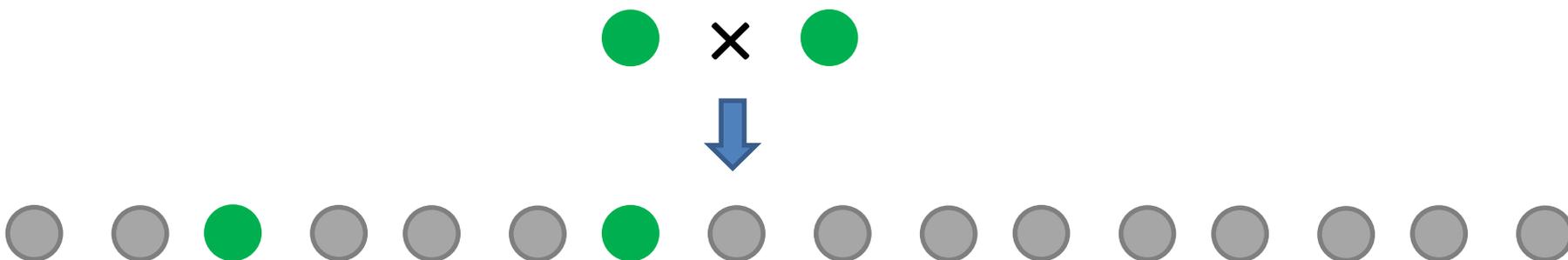
Maturité sexuelle :  
reproduction

# Adaptation

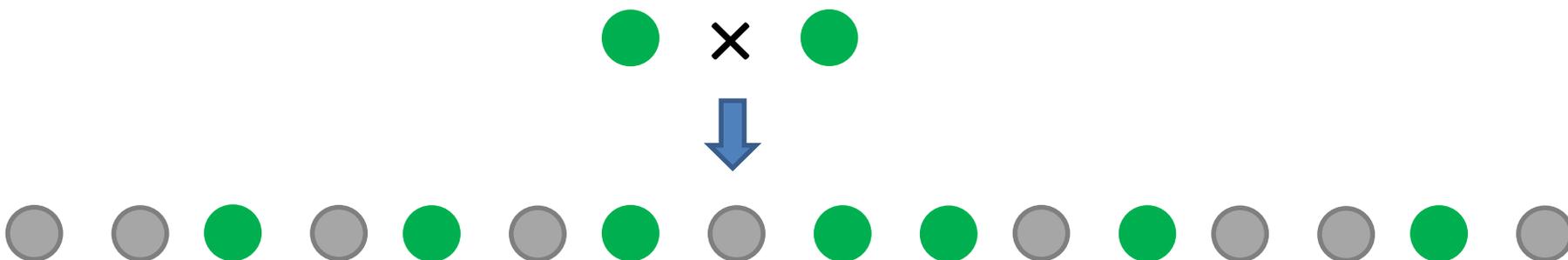


Reproduction : descendance

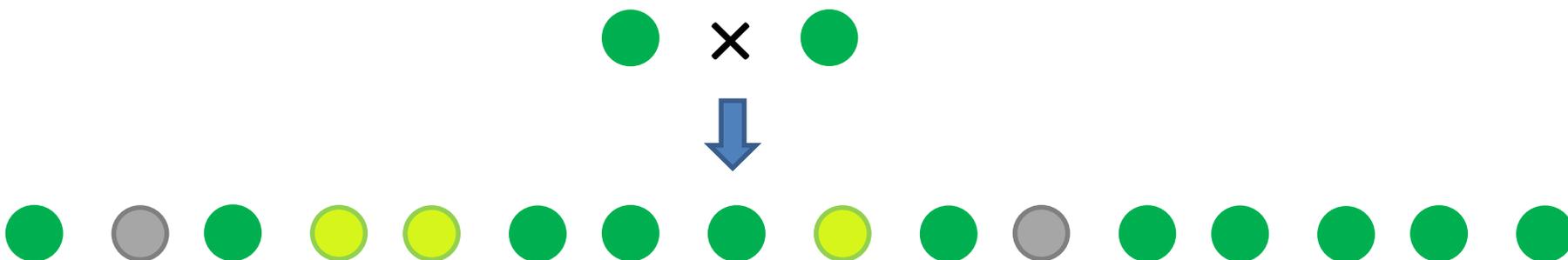
# Adaptation



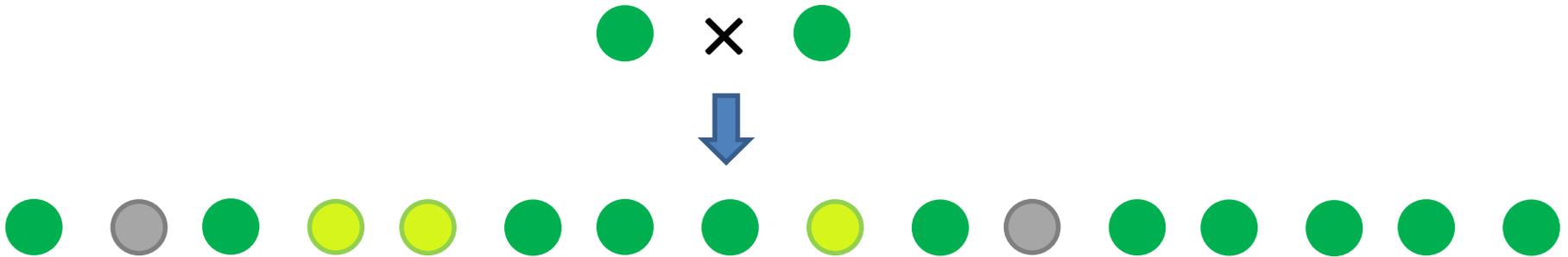
# Adaptation



# Adaptation



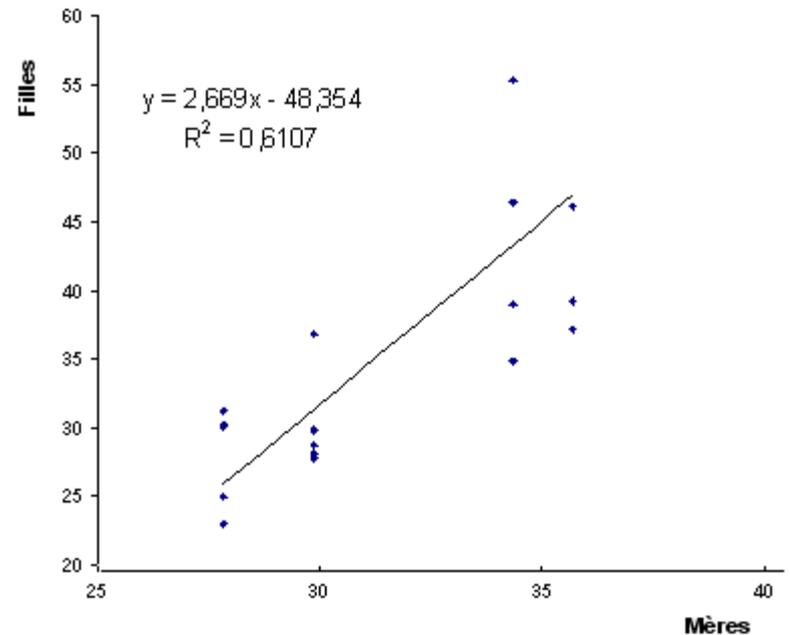
# Adaptation



Capacité à transmettre le caractère favorable : hérédité

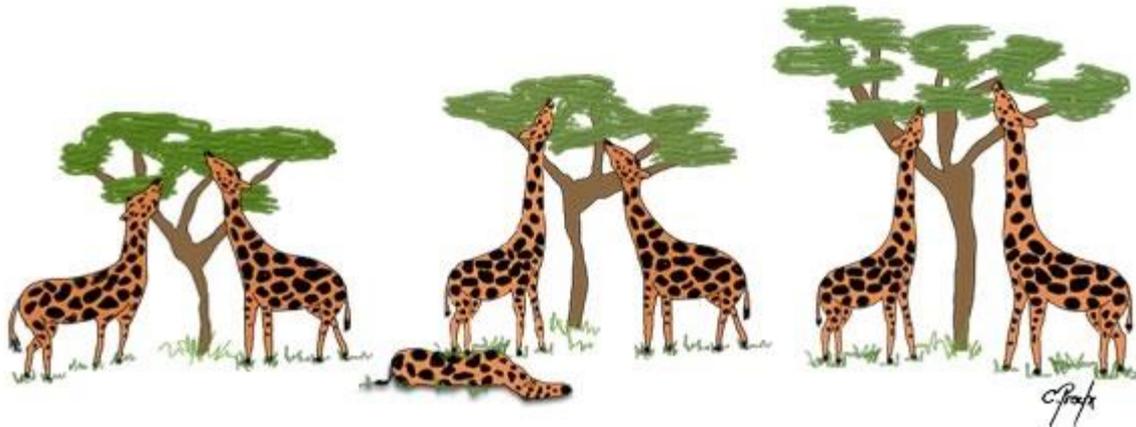
# Adaptation

- Quantifier le potentiel d'adaptation :
  - Variation
  - Héritabilité



# Adaptation

- Potentiel d'adaptation :
  - Variation
  - Héritabilité
  - ... de caractères **adaptatifs** pertinents



# Adaptation

- Potentiel d'adaptation :
  - Variation
  - Héritabilité
  - ... de caractères adaptatifs pertinents
- Caractère adaptatif : caractère expliquant le “succès reproducteur global”

# Adaptation

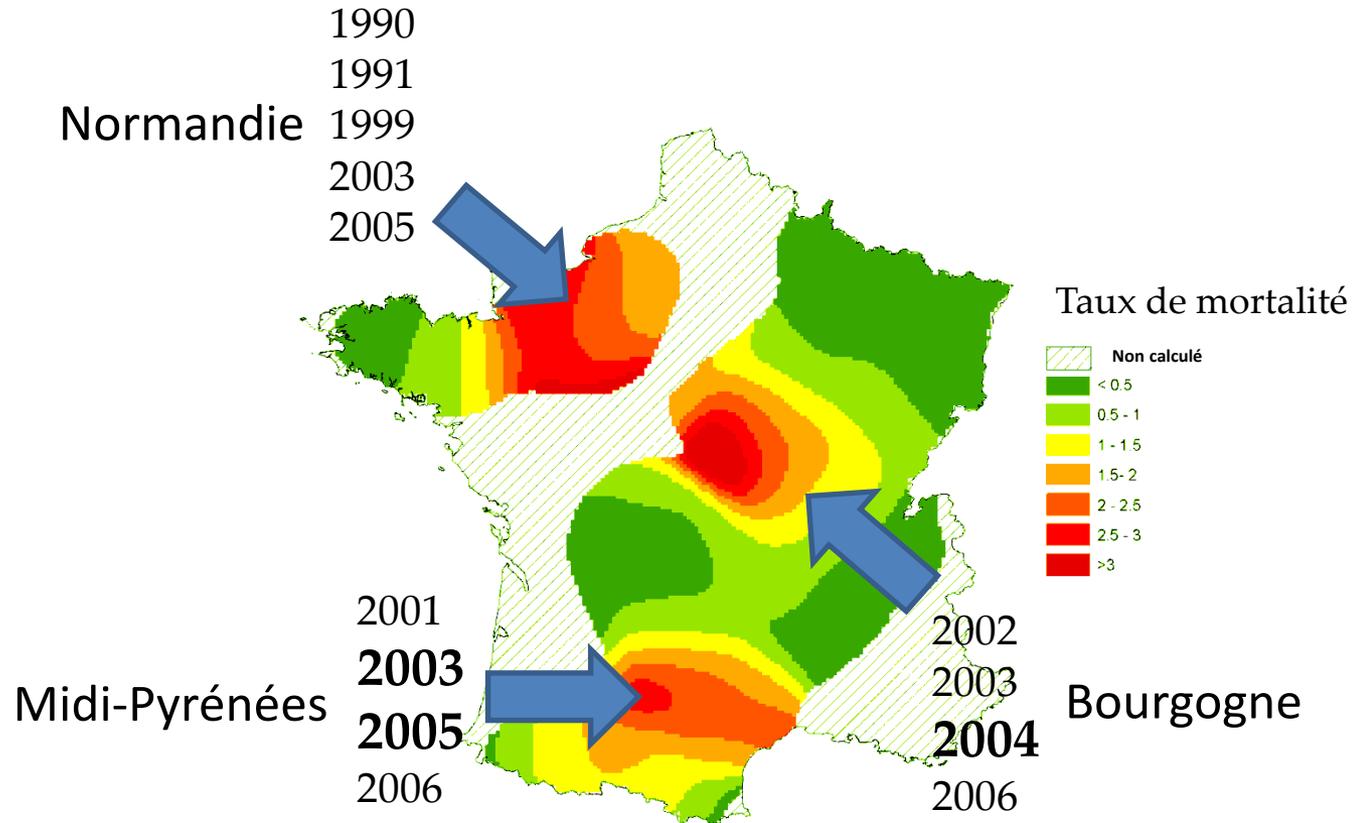
- Potentiel d'adaptation :
  - Variation
  - Héritabilité
  - ... des caractères adaptatifs pertinents
- Caractère adaptatif : caractère expliquant le “succès reproducteur global”
  - Reproduction
  - **Survie**

# Comment définir un caractère adaptatif ? Morts et survivants...

- Canicule de 2003, forêt d'Orléans (Thèse INRA A. Martinez-Meier)
- Des années 90 à 2008, succession de sécheresses (Thèse INRA A.S. Sergent)



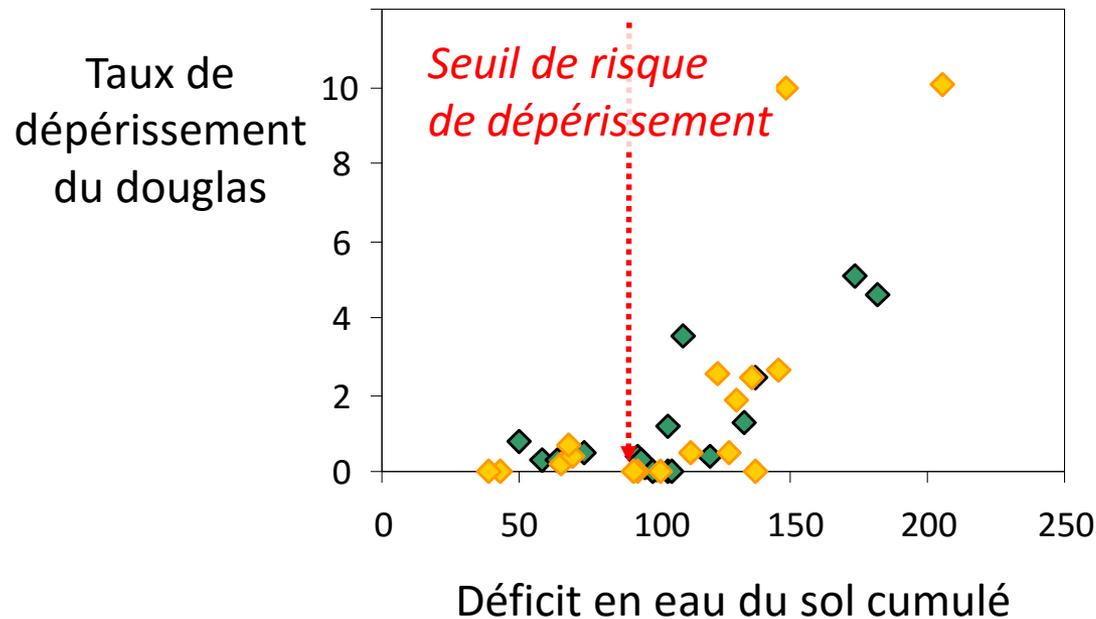
# Causes des dépérissements



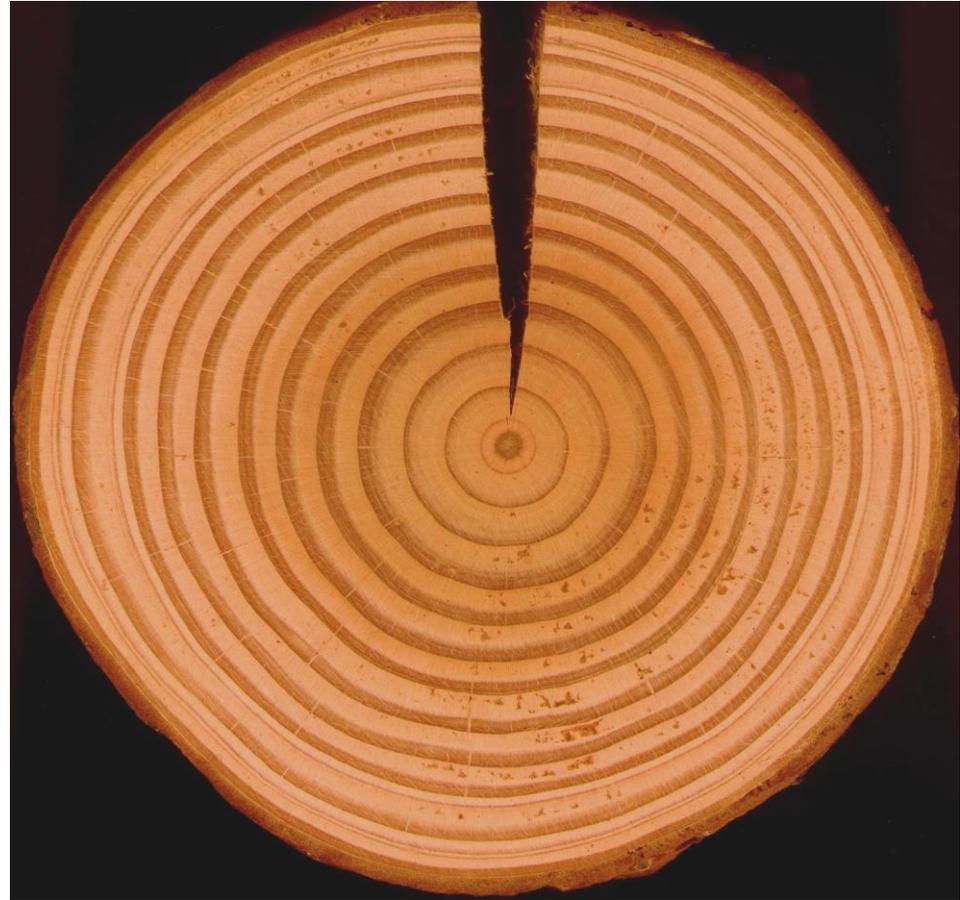
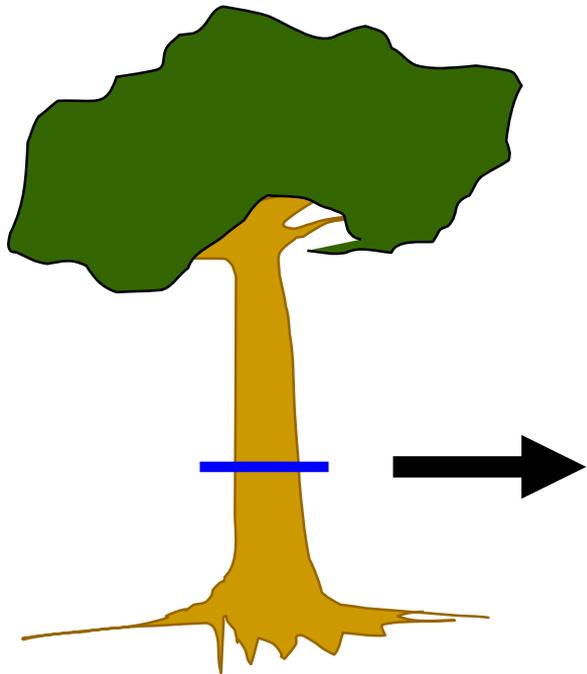
Sergent, Anne-Sophie, Philippe Rozenberg, Nathalie Bréda 2012 « Douglas-Fir Is Vulnerable to Exceptional and Recurrent Drought Episodes and Recovers Less Well on Less Fertile Sites », *Annals of Forest Science*, 1-12.

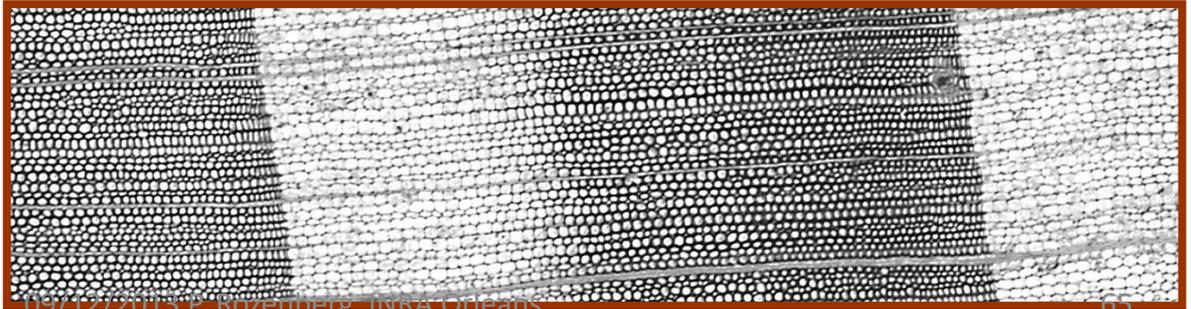
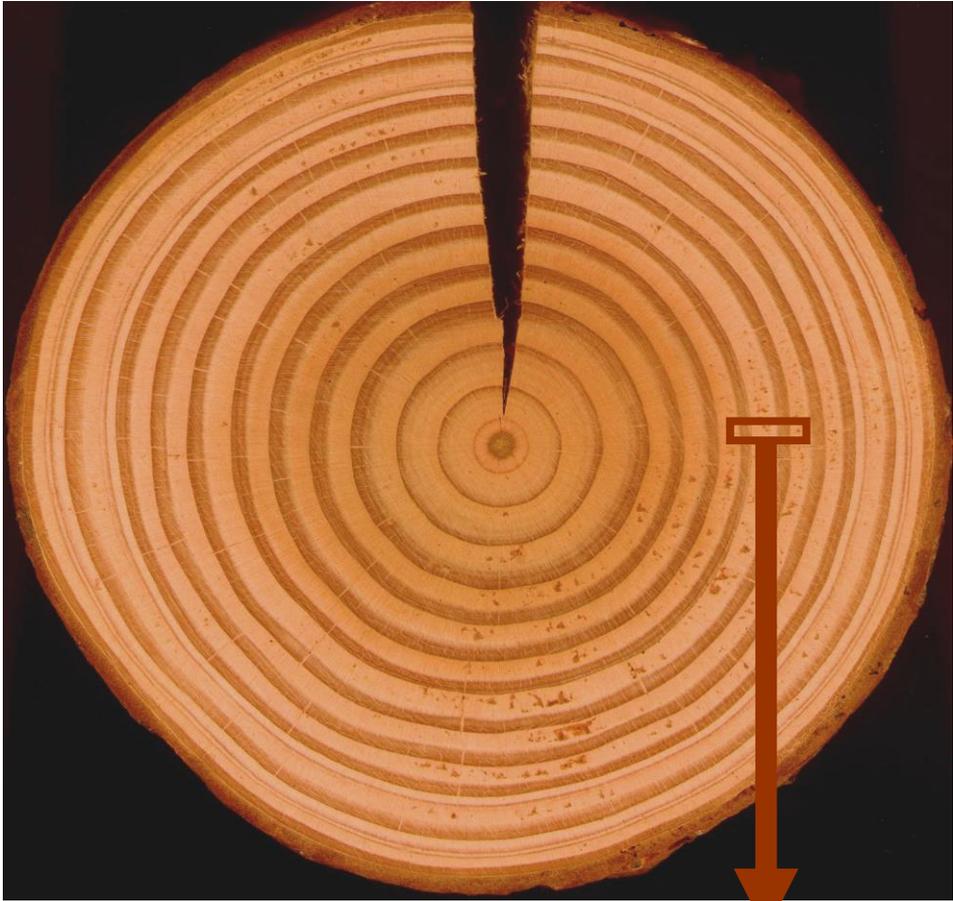
# Causes des dépérissements

- Relation avec le déficit hydrique du sol



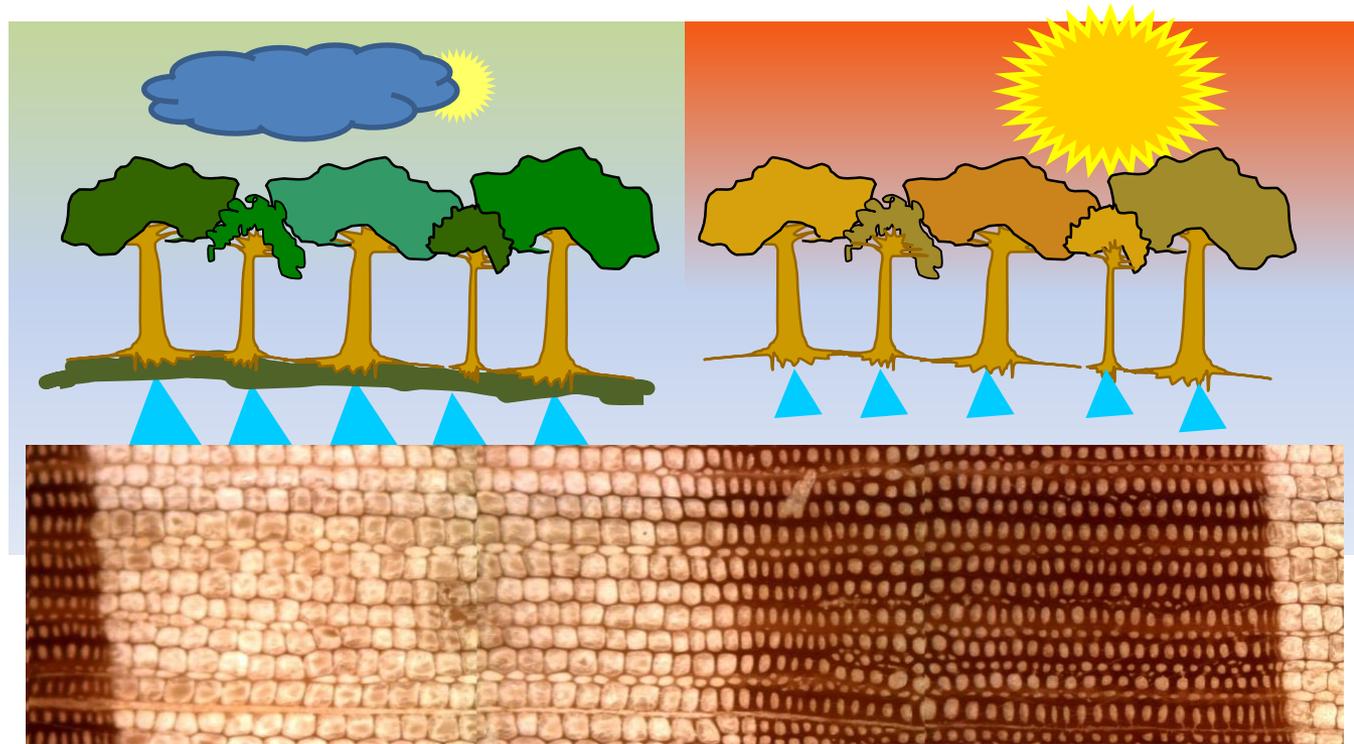
# Comment comparer des arbres morts et vivants ? Le bois !



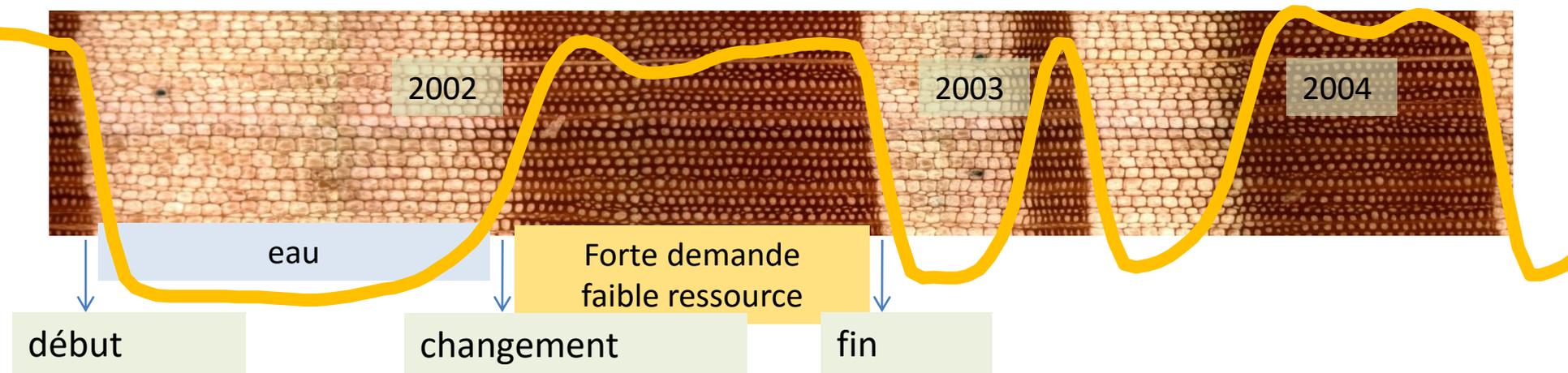


# Les cernes

- Un cerne = une année
- Fonctions
  - Soutien
  - Réserves
  - Conduction
- Accès rétrospectif



# Mise en évidence : la microdensitométrie

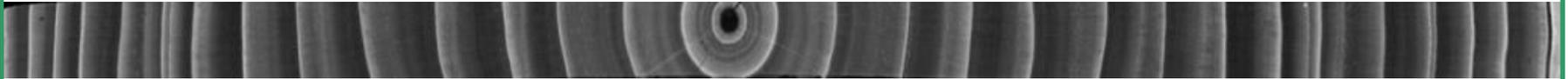


# Microdensitométrie indirecte aux rayons X

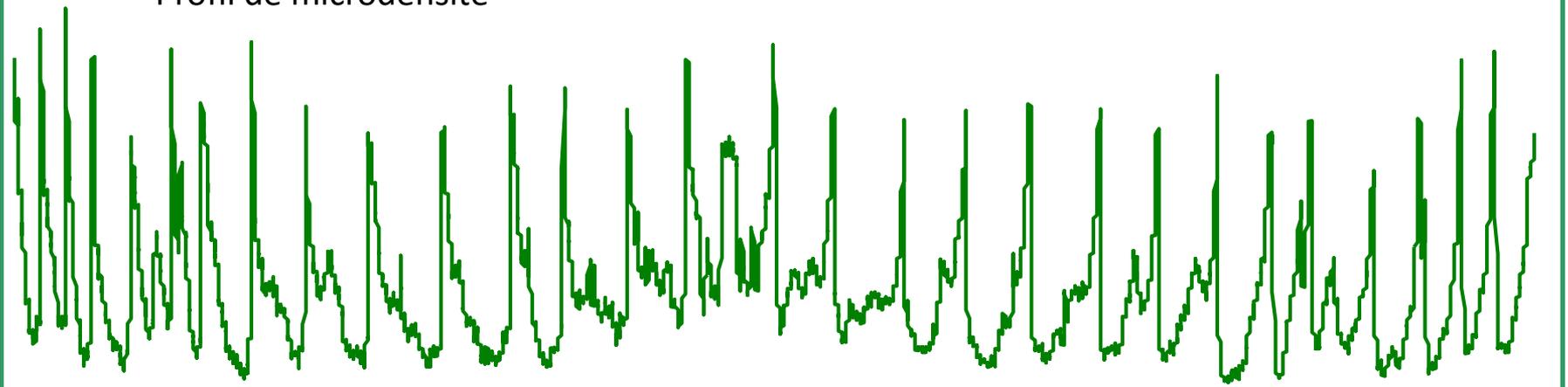
Echantillon de bois



Image aux rayons X



Profil de microdensité



# Paires d'arbres morts et survivants



Récolte de carottes sur des paires d'arbres morts après la canicule de 2003, et survivants

# Profils de microdensité



Pith

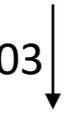


X-ray picture

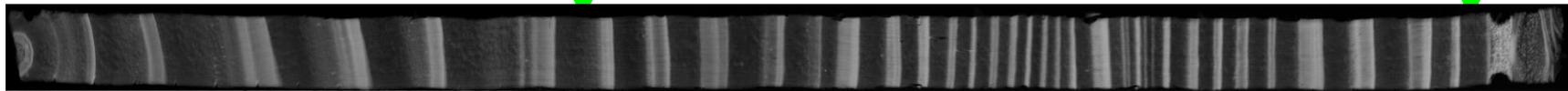
1976



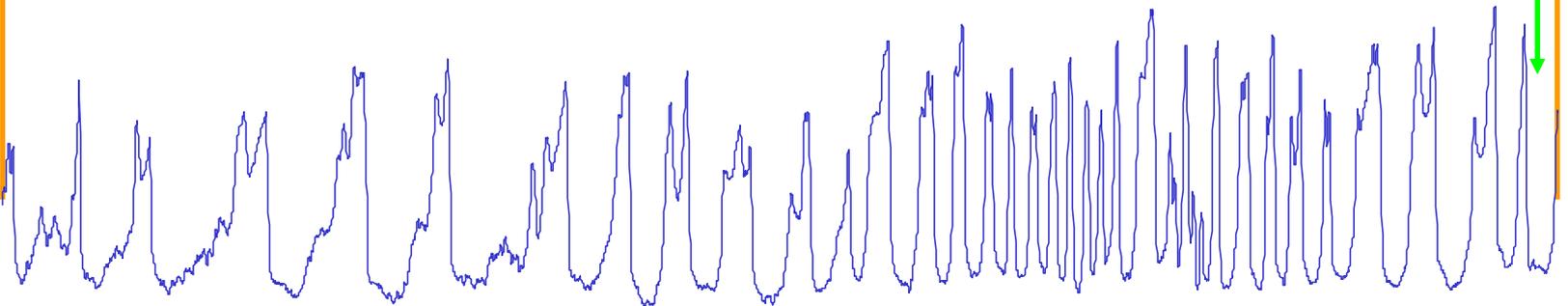
Bark



2003

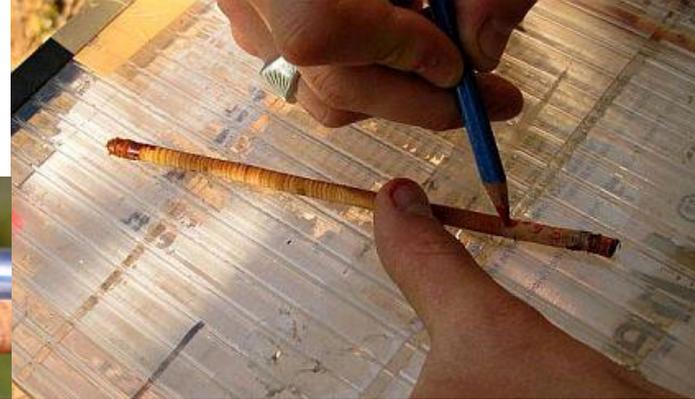


Microdensity Profile

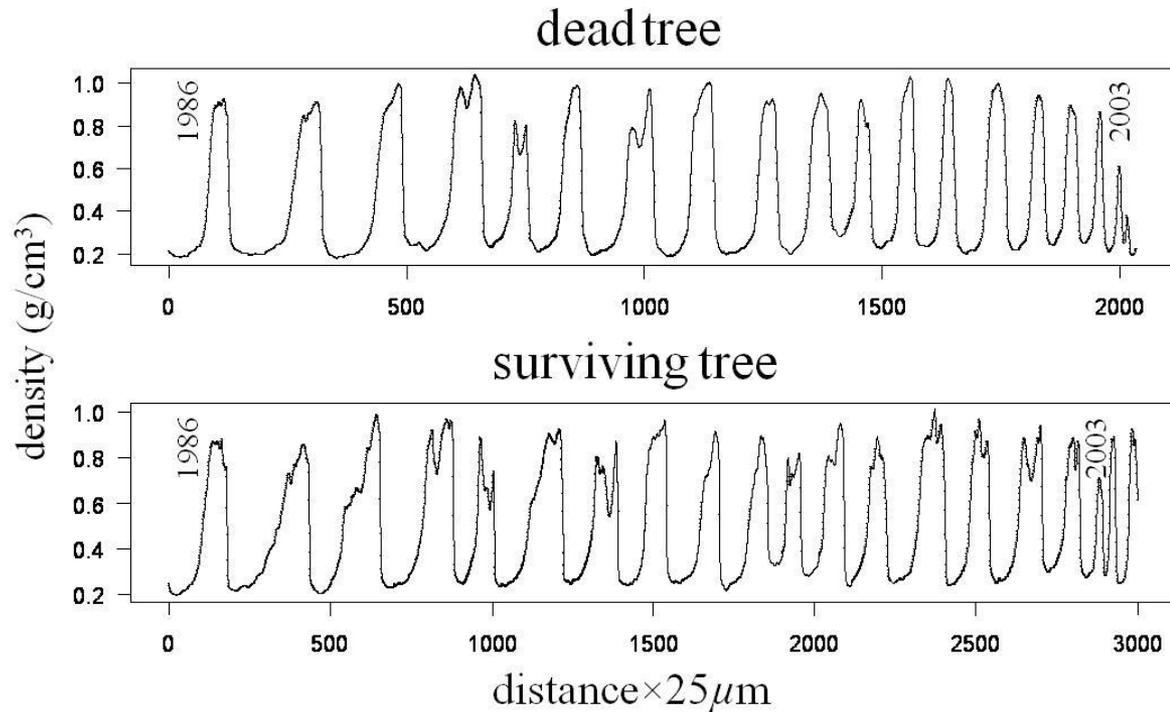


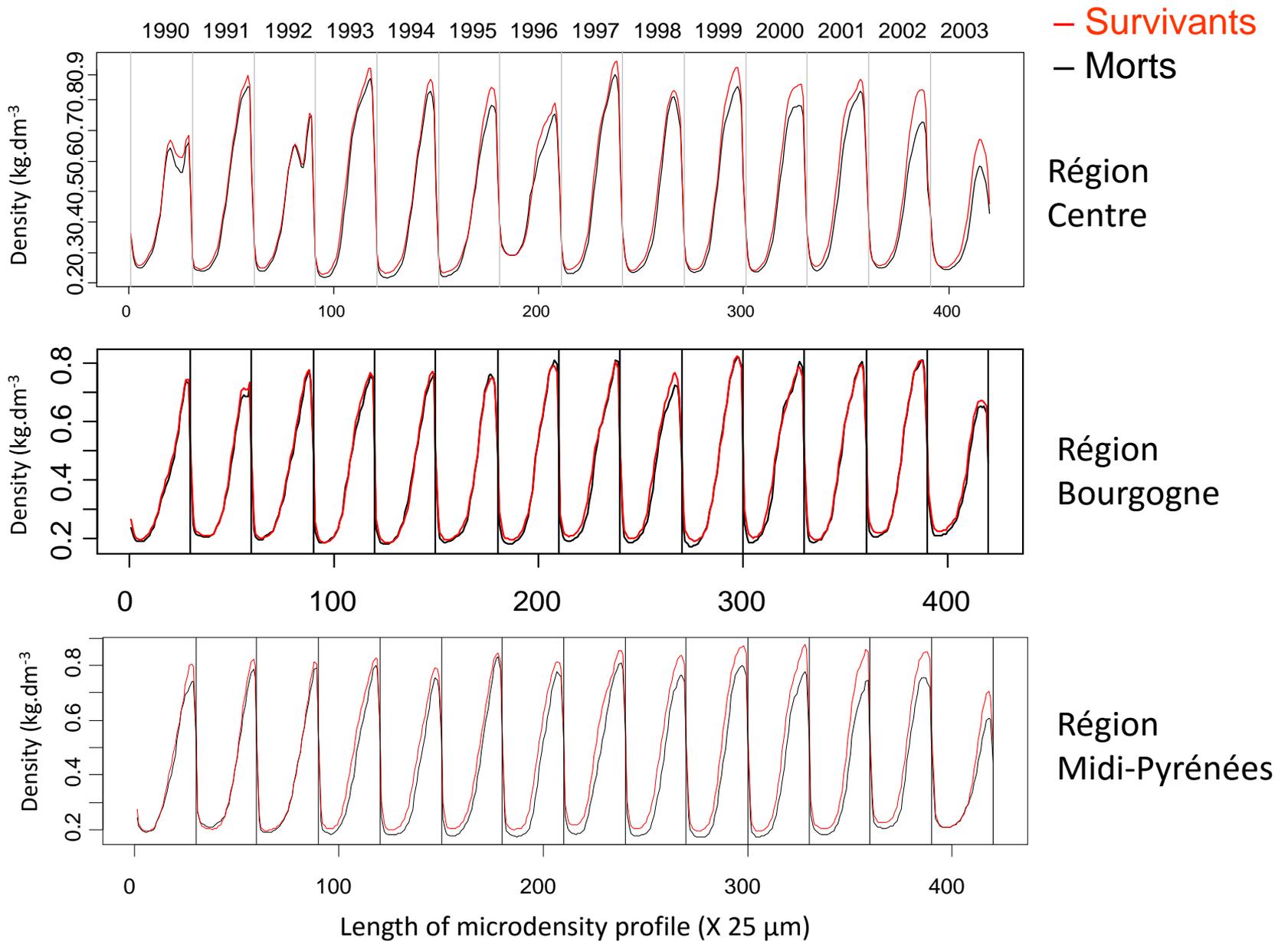
Distance (X 25 microns)

# Lien survie / densité du bois ?

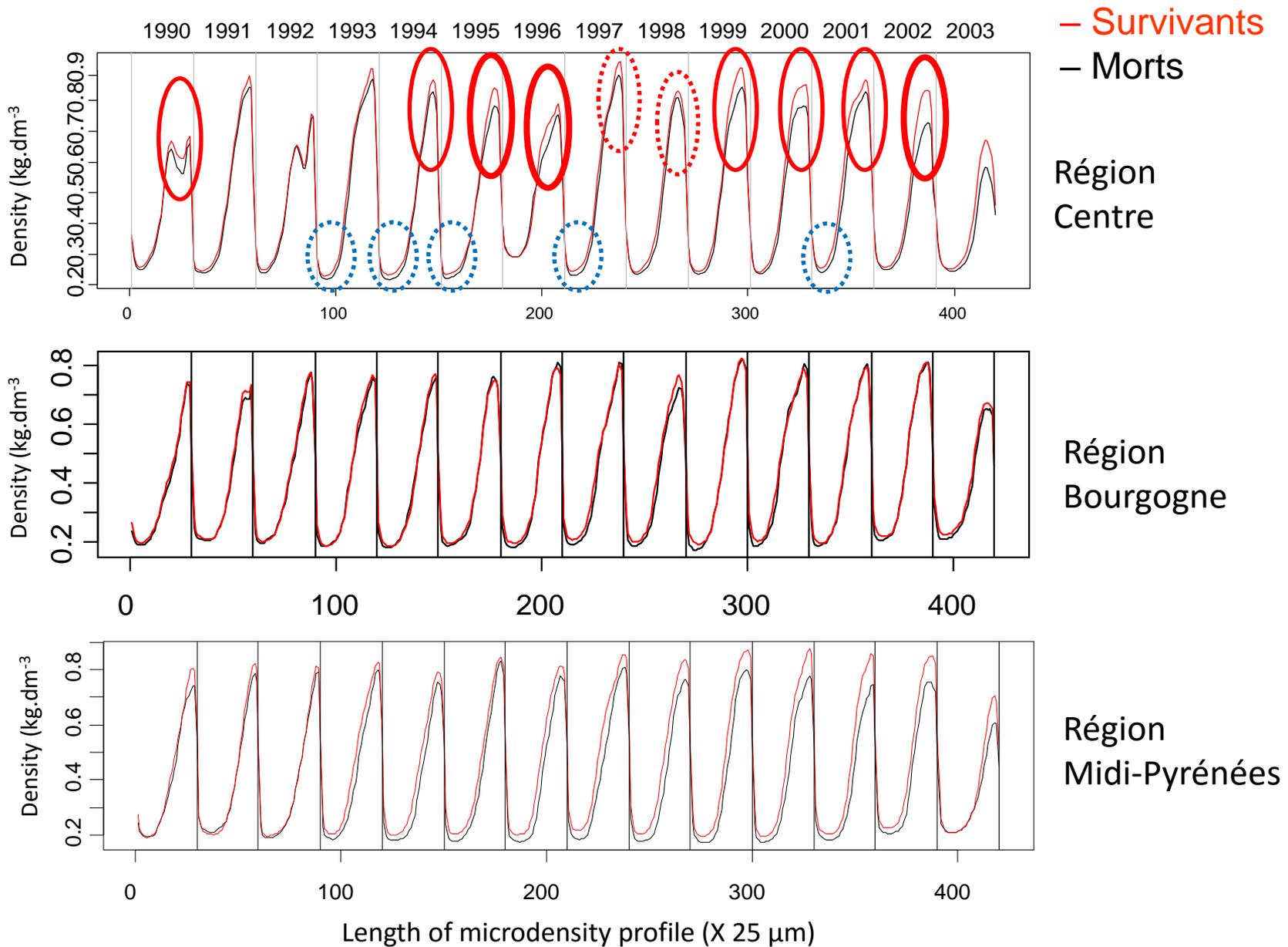


Martinez-Meier, A., L. Sanchez, M. Pastorino, L. Gallo, et P. Rozenberg. « What Is Hot in Tree Rings? the Wood Density of Surviving Douglas-firs to the 2003 Drought and Heat Wave. » *Forest Ecology and Management* 256, n° 4 (2008).

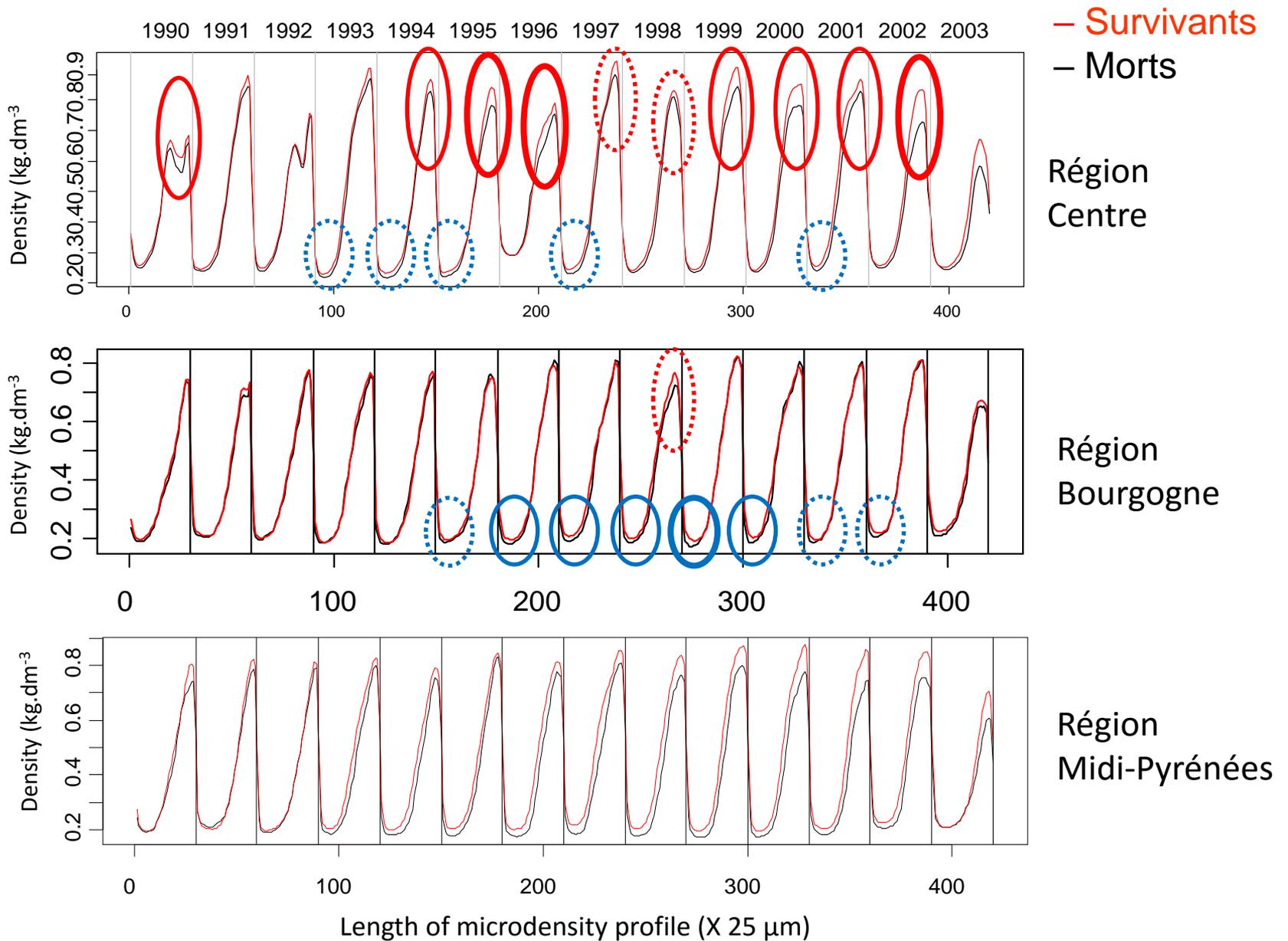




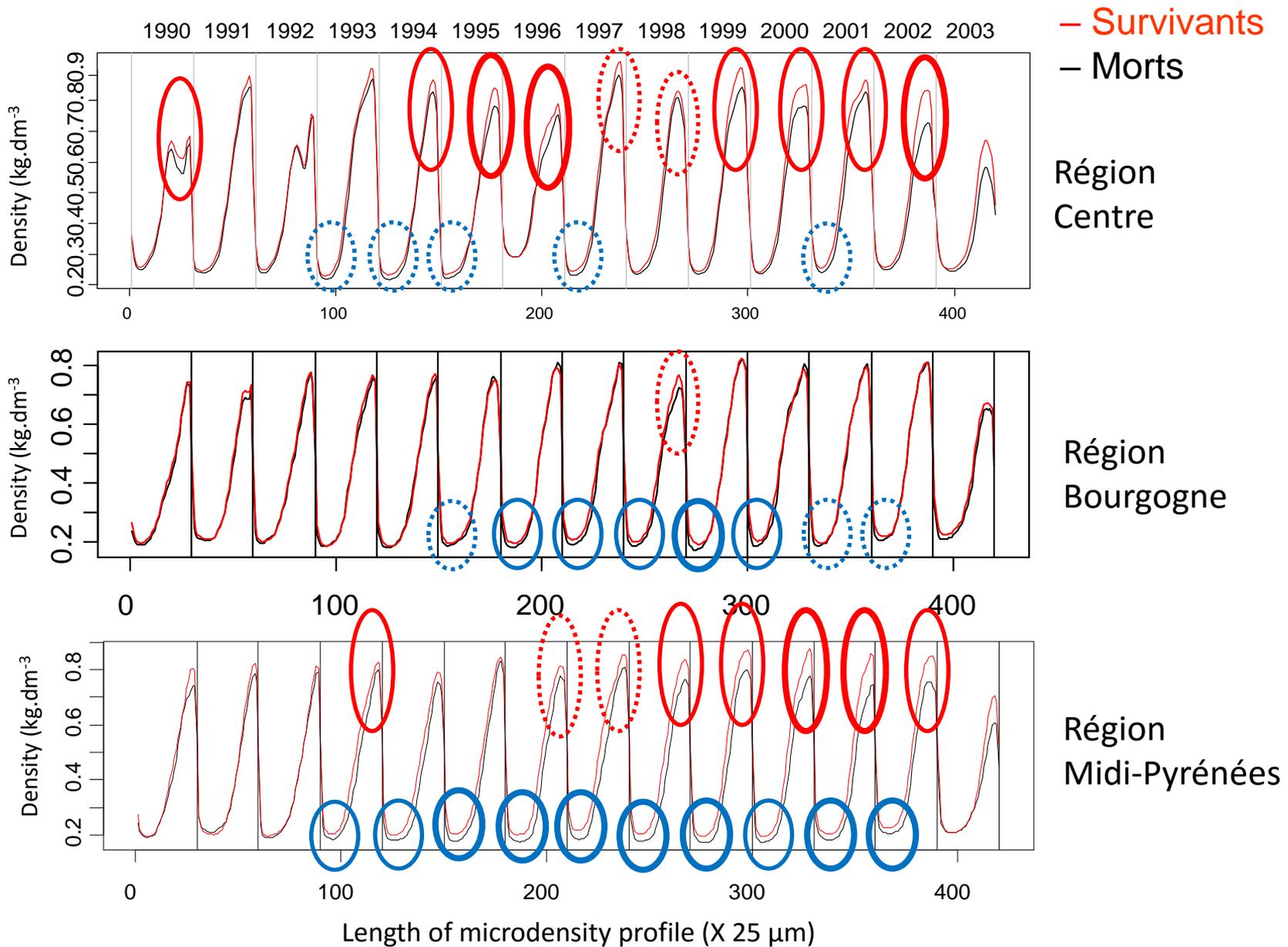
Britez, Manuela Ruiz Diaz, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, et Philippe Rozenberg. « Wood Density Proxies of Adaptive Traits Linked with Resistance to Drought in Douglas Fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco) ». *Trees*, s. d., 1-16.



Britez, Manuela Ruiz Diaz, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, et Philippe Rozenberg. « Wood Density Proxies of Adaptive Traits Linked with Resistance to Drought in Douglas Fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco) ». *Trees*, s. d., 1-16.



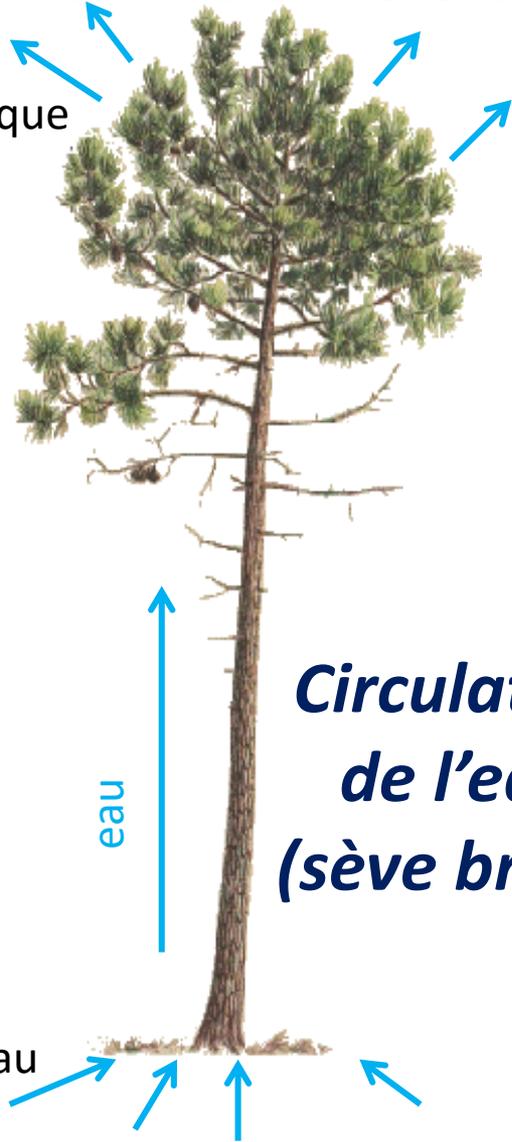
Britez, Manuela Ruiz Diaz, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, et Philippe Rozenberg. « Wood Density Proxies of Adaptive Traits Linked with Resistance to Drought in Douglas Fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco) ». *Trees*, s. d., 1-16.



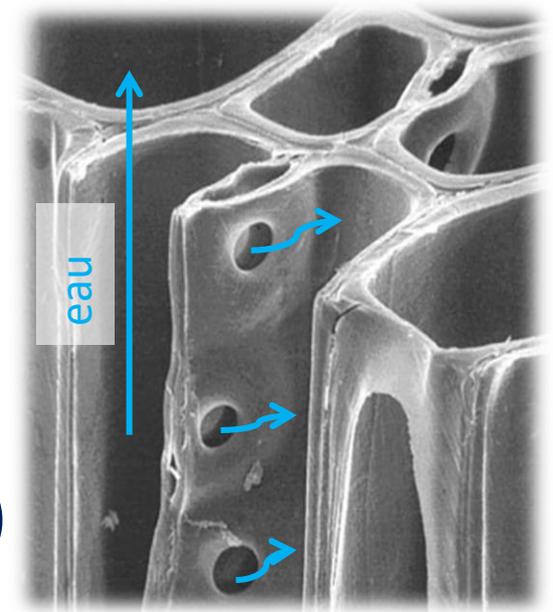
Britez, Manuela Ruiz Diaz, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, et Philippe Rozenberg. « Wood Density Proxies of Adaptive Traits Linked with Resistance to Drought in Douglas Fir (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco) ». *Trees*, s. d., 1-16.

# Pourquoi une densité plus élevée chez les survivants ? Conduction de la sève

Demande atmosphérique



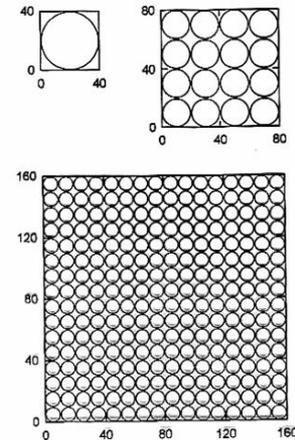
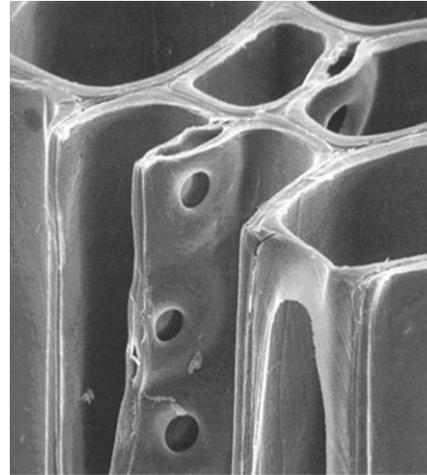
***Circulation  
de l'eau  
(sève brute)***



Disponibilité en eau

# Pourquoi ?

- Conductivité : diamètre des cellules à la puissance 4 !

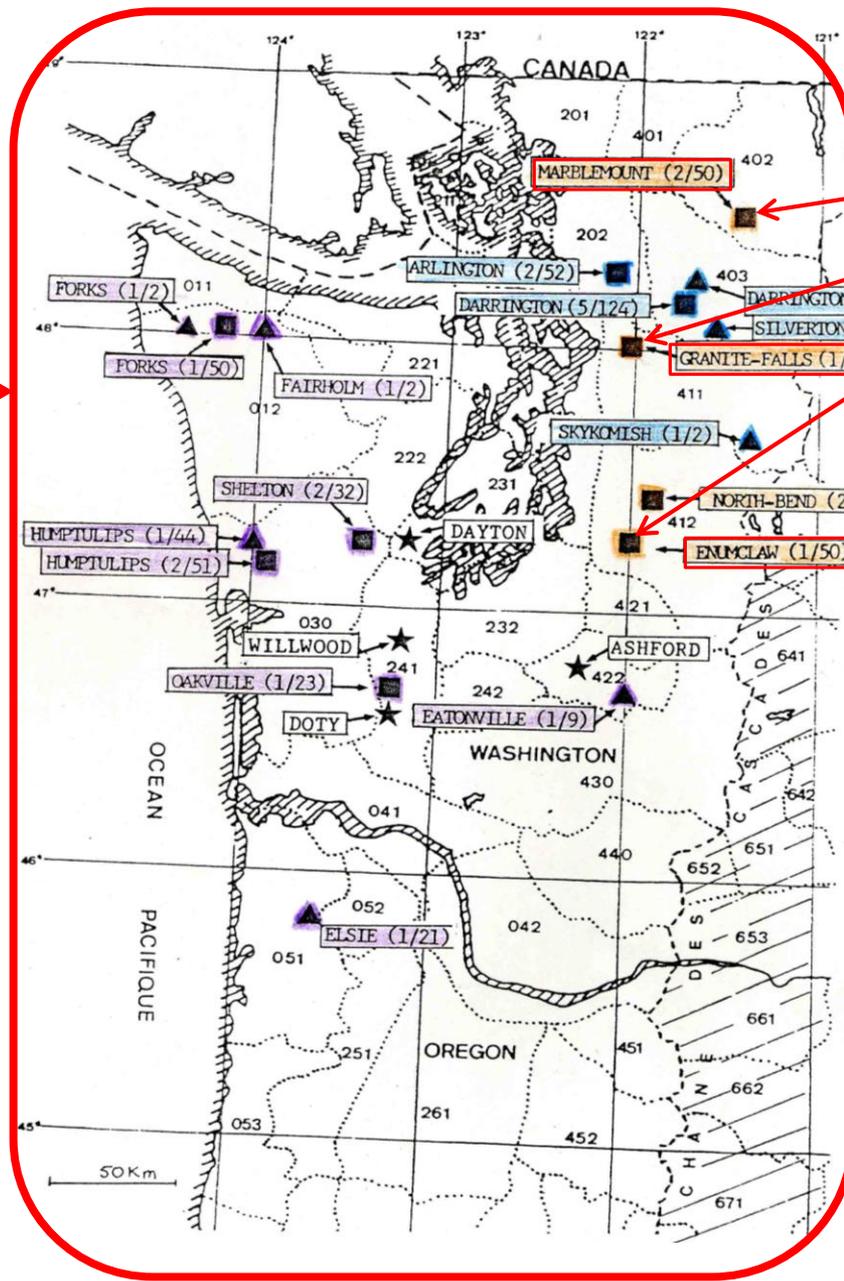


- Arbres plus résistants à la sécheresse = densité plus élevée = cellules plus petites
  - Vérifié chez le douglas et l'épicéa commun
  - Mais... non vérifié chez le pin maritime et le hêtre (régulation au niveau des feuilles et non du bois ?)

# Potentiel d'adaptation

1. Définition de caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse
2. Mesure de leur potentiel d'adaptation
  - Variabilité et héritabilité
  - Dispositifs expérimentaux

Aire naturelle du douglas

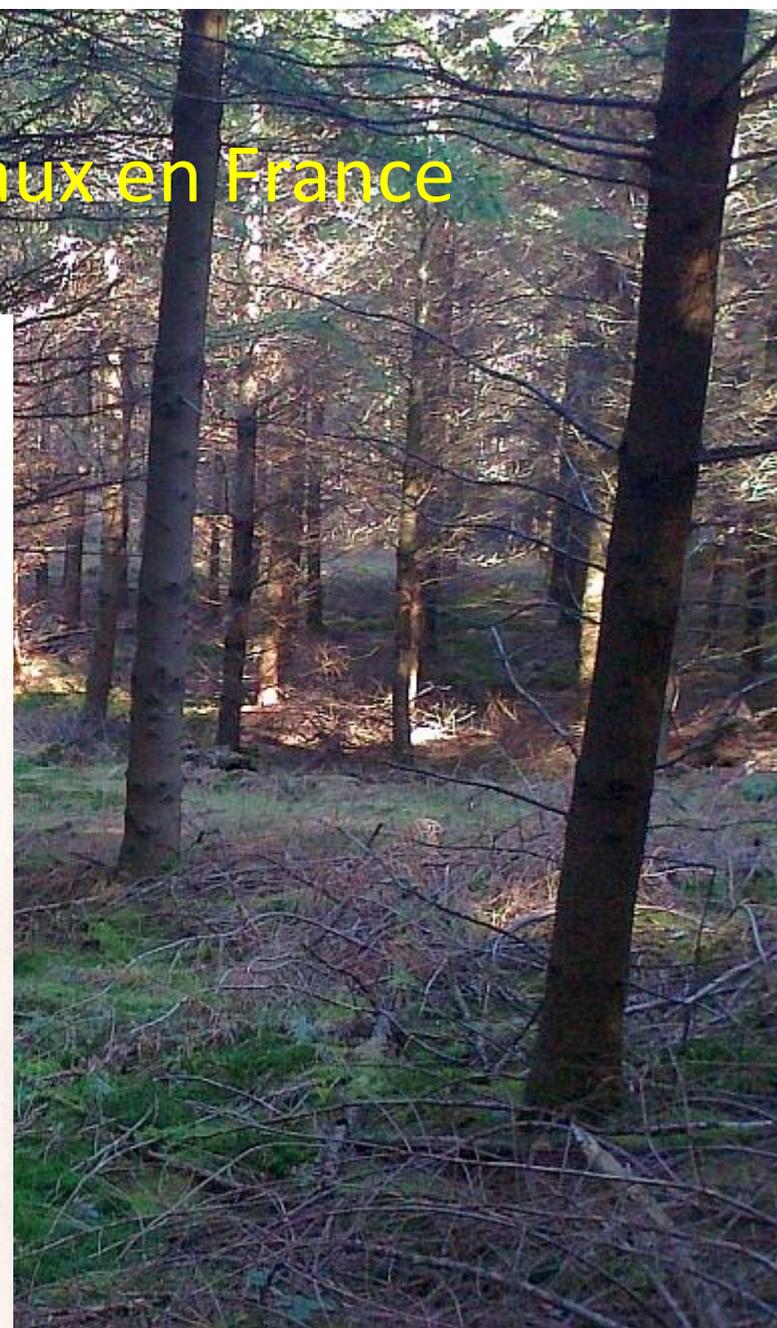
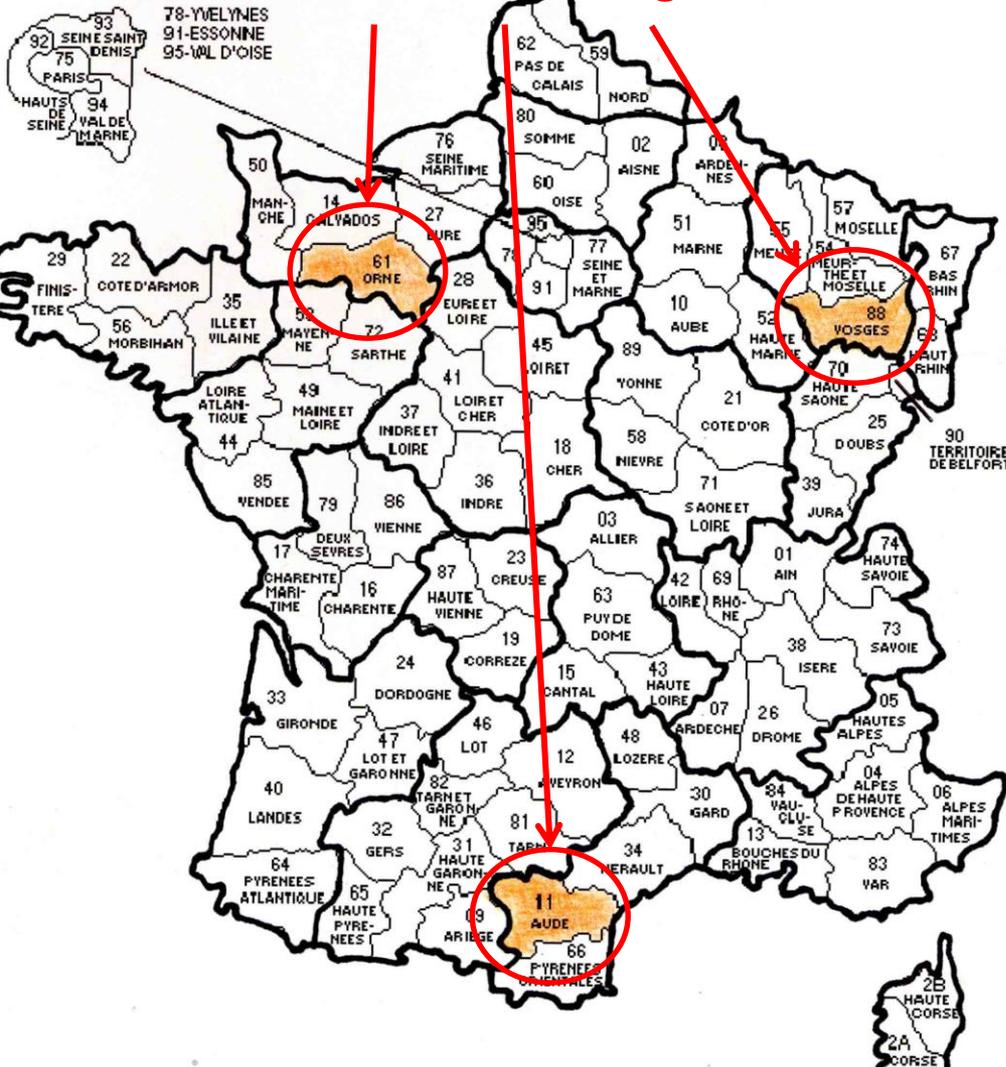


Trois provenances  
Marblemount  
Granite-Falls  
Enumclaw

Représentatives  
du douglas  
planté  
en France

# Trois dispositifs expérimentaux en France

Orne, Aude, Vosges



1600 carottes



# 1600 profils microdensitométriques

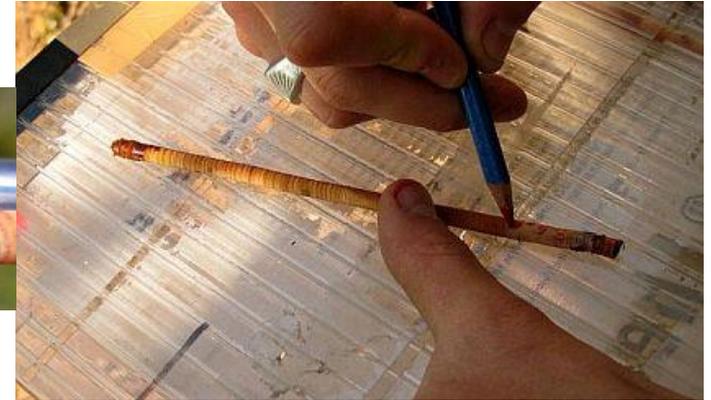
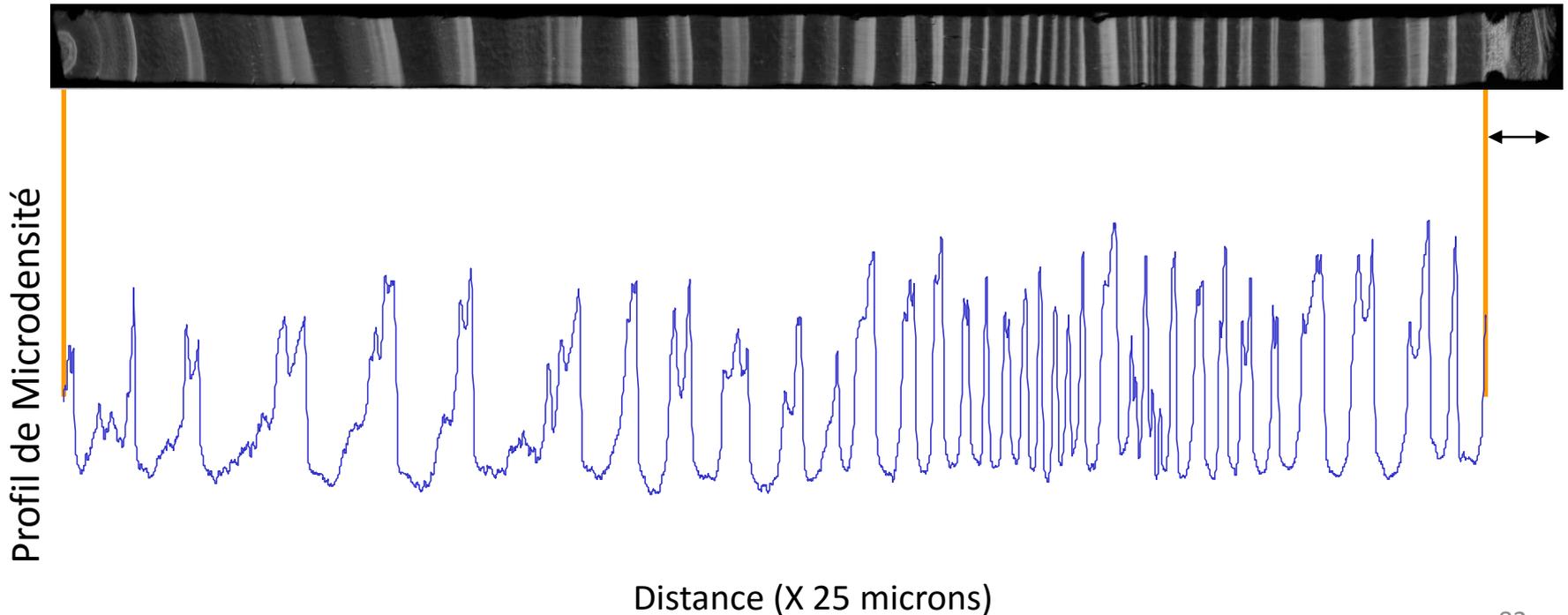
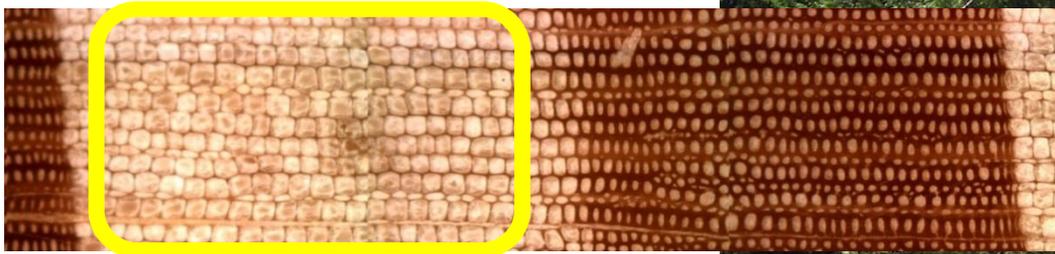


Image à rayons X



# Résultats

- Estimations de la **variance** et de l'**héritabilité** de tous ces caractères de résistance à la sécheresse chez le douglas
- Identification des caractères avec un **potentiel d'adaptation** élevé
- Densité du bois initial



# Perspectives : comment utiliser ces résultats ?

- Forêts plantées : produire et planter des variétés plus résistantes à la sécheresse



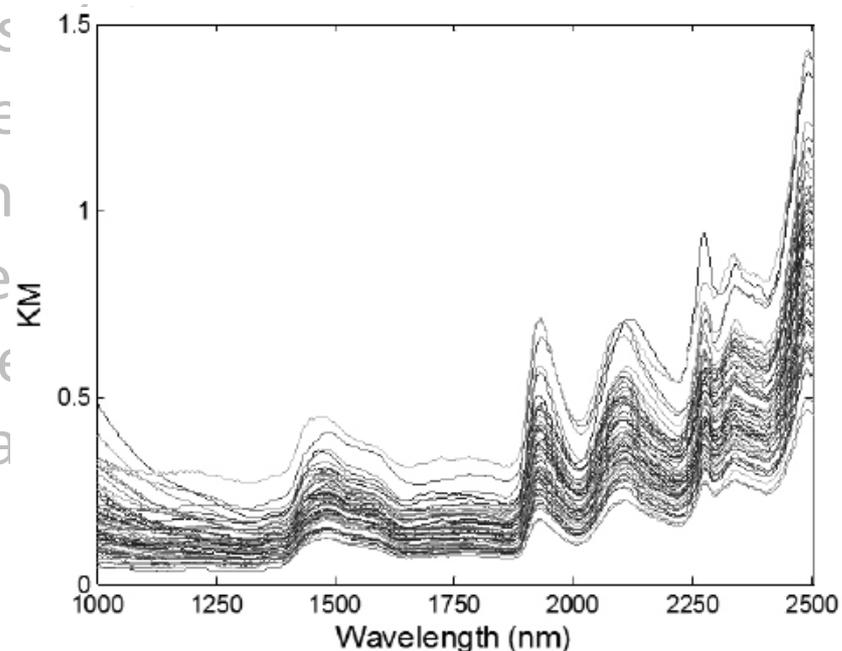
# Perspectives : comment utiliser ces résultats ?

- Forêts plantées : produire et planter des variétés plus résistantes à la sécheresse
- Forêts régénérées naturellement : sélectionner les géniteurs des prochaines régénérations naturelles



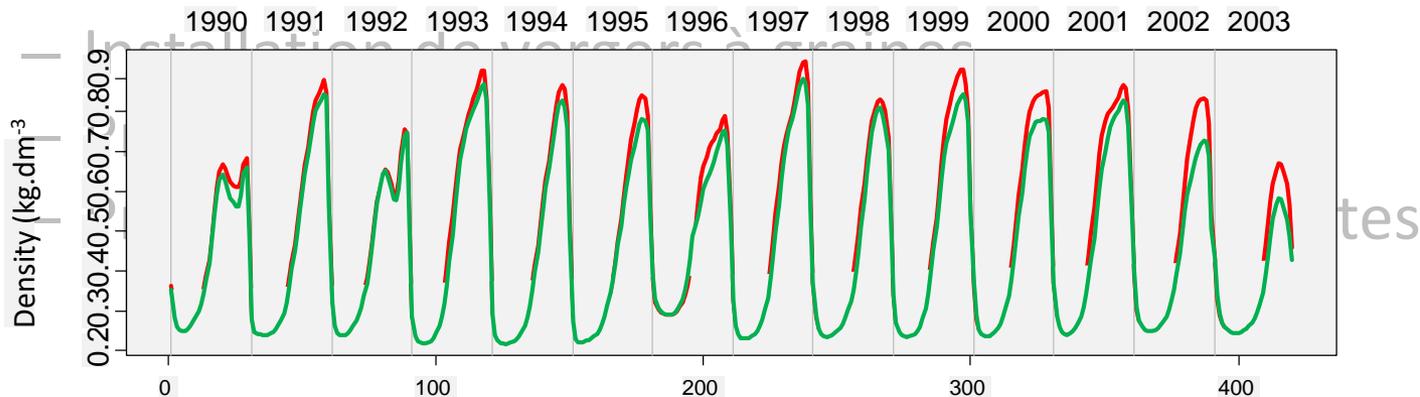
# Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
  - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
    - Mais... mesure de caractères du bois : âge. Marqueurs ?  
Perspective : spectroscopie proche-infrarouge
  - Sélection d'individus
  - Croisements artificiels
  - Tests des descendants
  - Installation de verges
  - Production de graines
  - Production et plantation



# Forêts plantées

- Programme d'amélioration génétique
  - Mesure des caractères sur un grand nombre d'individus
    - Mais... mesure de caractères du bois
    - Perspective : spectroscopie proche infrarouge
  - Sélection d'individus résistants
  - Croisements artificiels
  - Tests des descendants
  - Installation de vergers à graines





eurs ?

- Croisements artificiels
- Tests des descendants
- Installation de vergers à graines
- Production de graines
- Production et plantation de variétés résistantes



- Croisements artificiels
- **Tests des descendants**
- Installation de vergers à graines
- Production de graines
- Production et plantation de variétés résistantes

- Programme

- Mesure de  
d'individus

- Mais... n  
Perspect

- Sélection

- Croisements artificiels

- Tests des descendants

- **Installation de vergers à graines**

- Production de graines

- Production et plantation de variétés résistantes



eurs ?

- Programme de

- Mesure des  
d'individus

- Mais... me  
Perspectiv

- Sélection d'

- Croisement

- Tests des de

- Installation

- **Production de graines**

- Production et plantation de variétés résistantes



# Forêts plantées

- Progr

- Me
  - d'in

- 

- Sél

- Cro

- Tes

- Ins

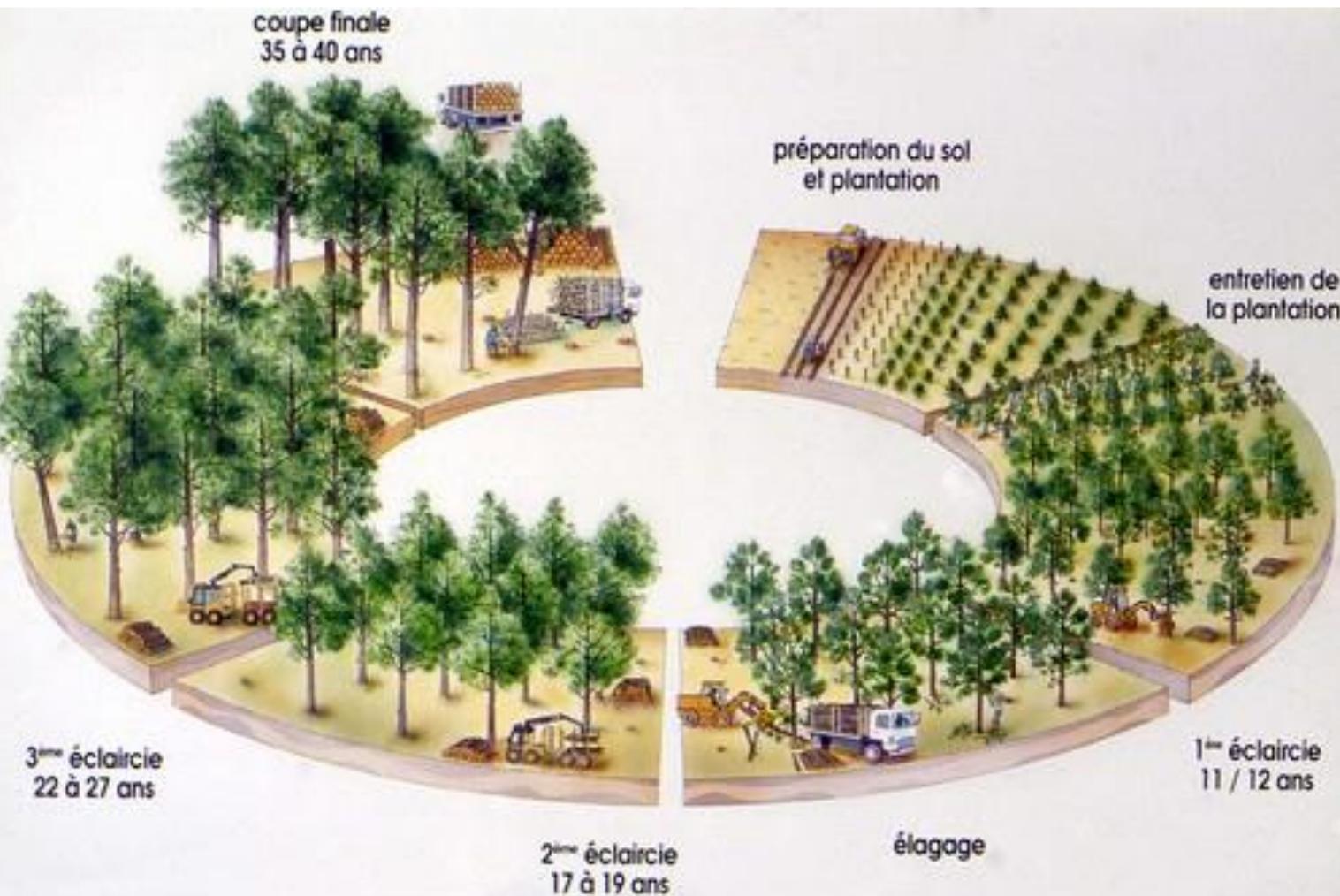
- Production de graines

- Production et plantation de variétés résistantes



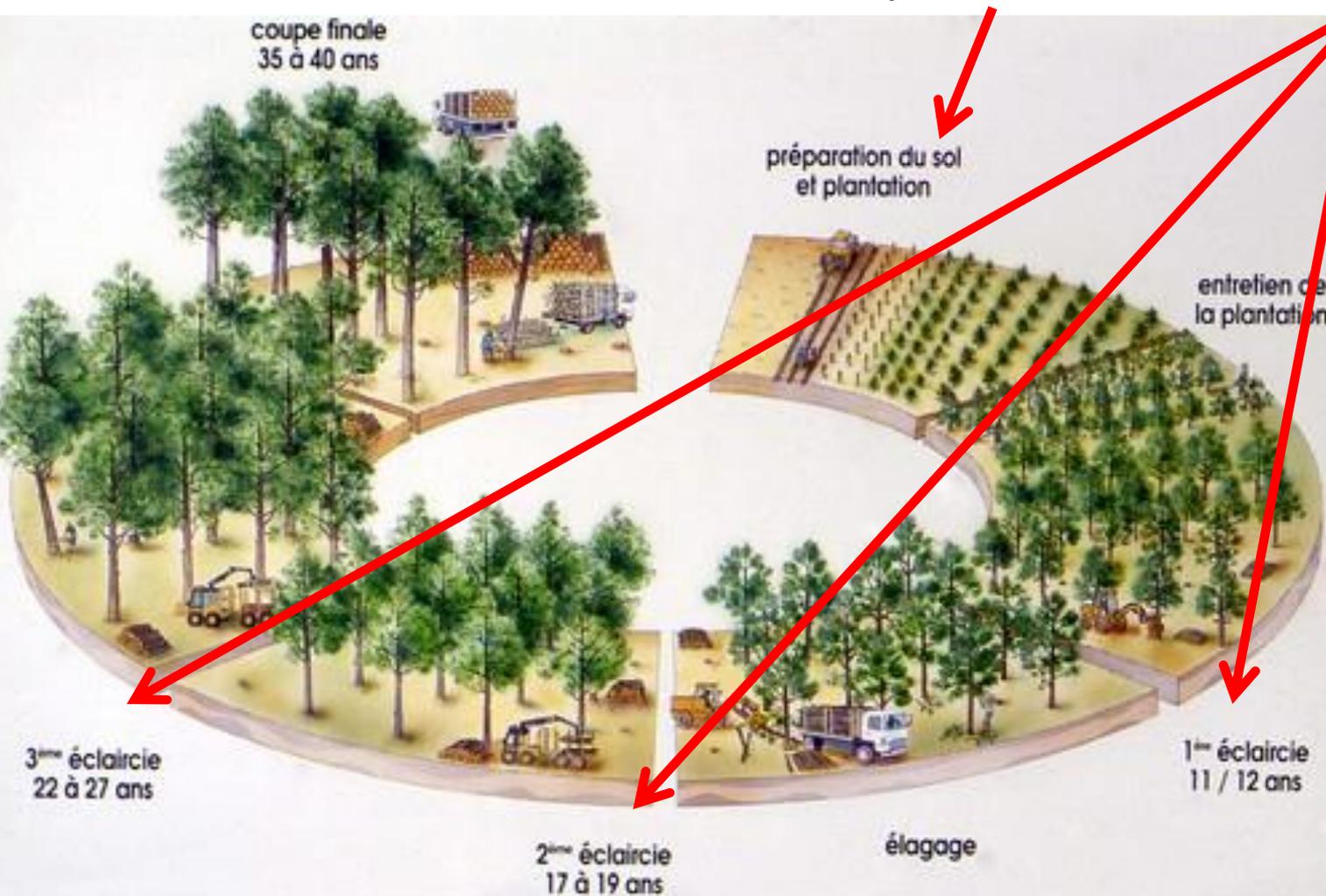
eurs ?

# Sylviculture



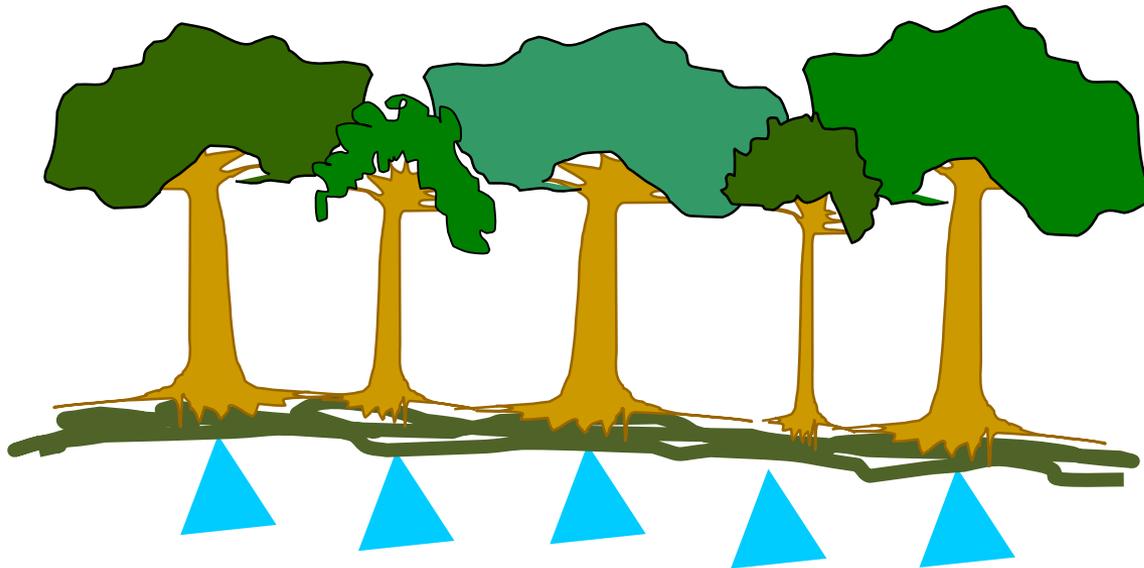
# Sylviculture

- Choisir espèces et variétés résistantes
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies



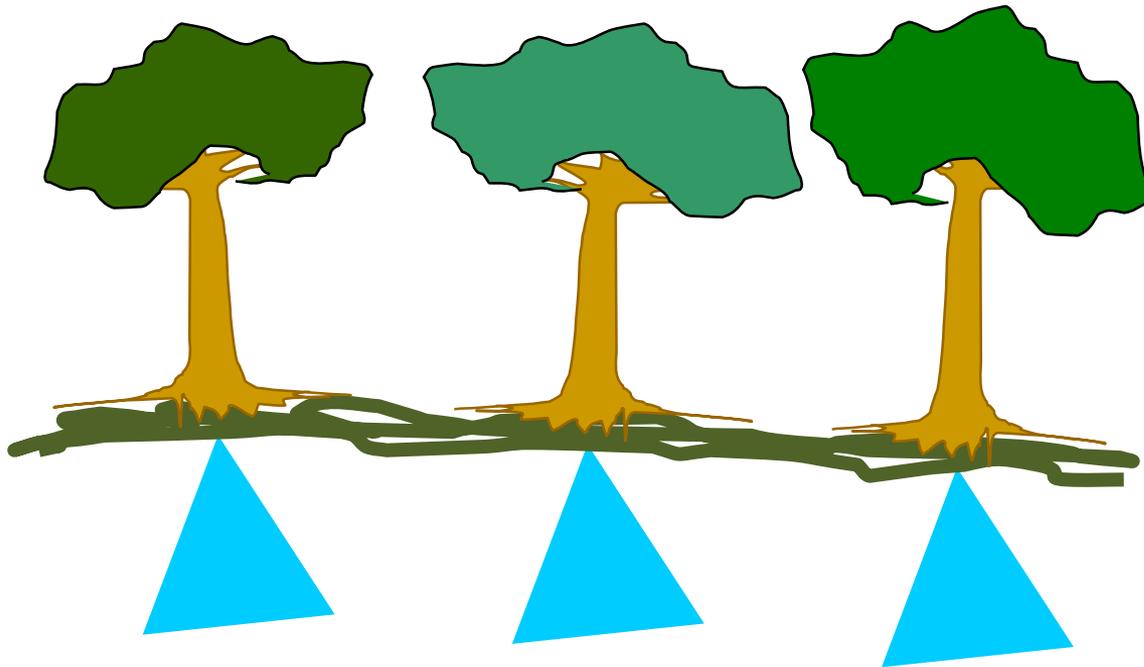
# Sylviculture

- Choisir espèces et variétés résistantes
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies



# Sylviculture

- Choisir espèces et variétés résistantes
- Diminuer la densité lors de la plantation et des éclaircies

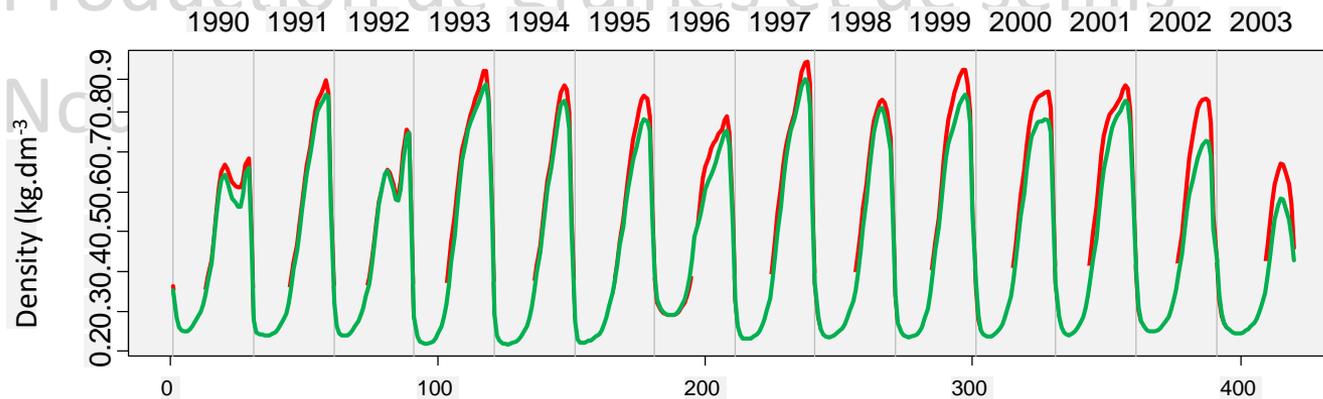


# Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
  - Caractères du bois : technique



- Repérage des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et de semis



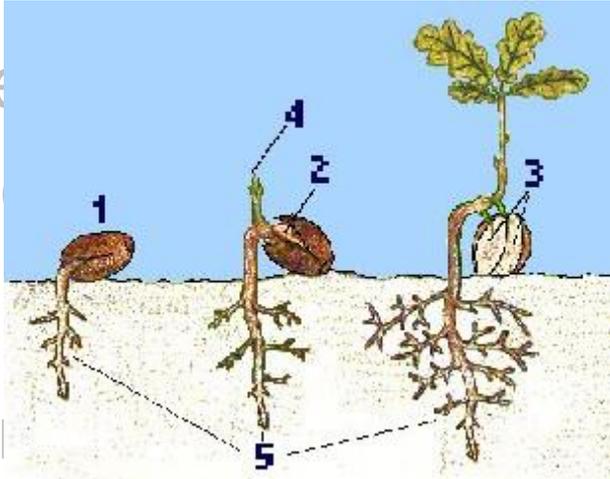
# Forêts régénérées naturellement

- Mesure des caractères de résistance
  - Caractères du bois : technique
- Repérage et sélection des arbres résistants
- Élimination des autres arbres
- Croisements naturels
- Production de graines et
- Nouvelle génération plus



# Forêts régénérées naturellement

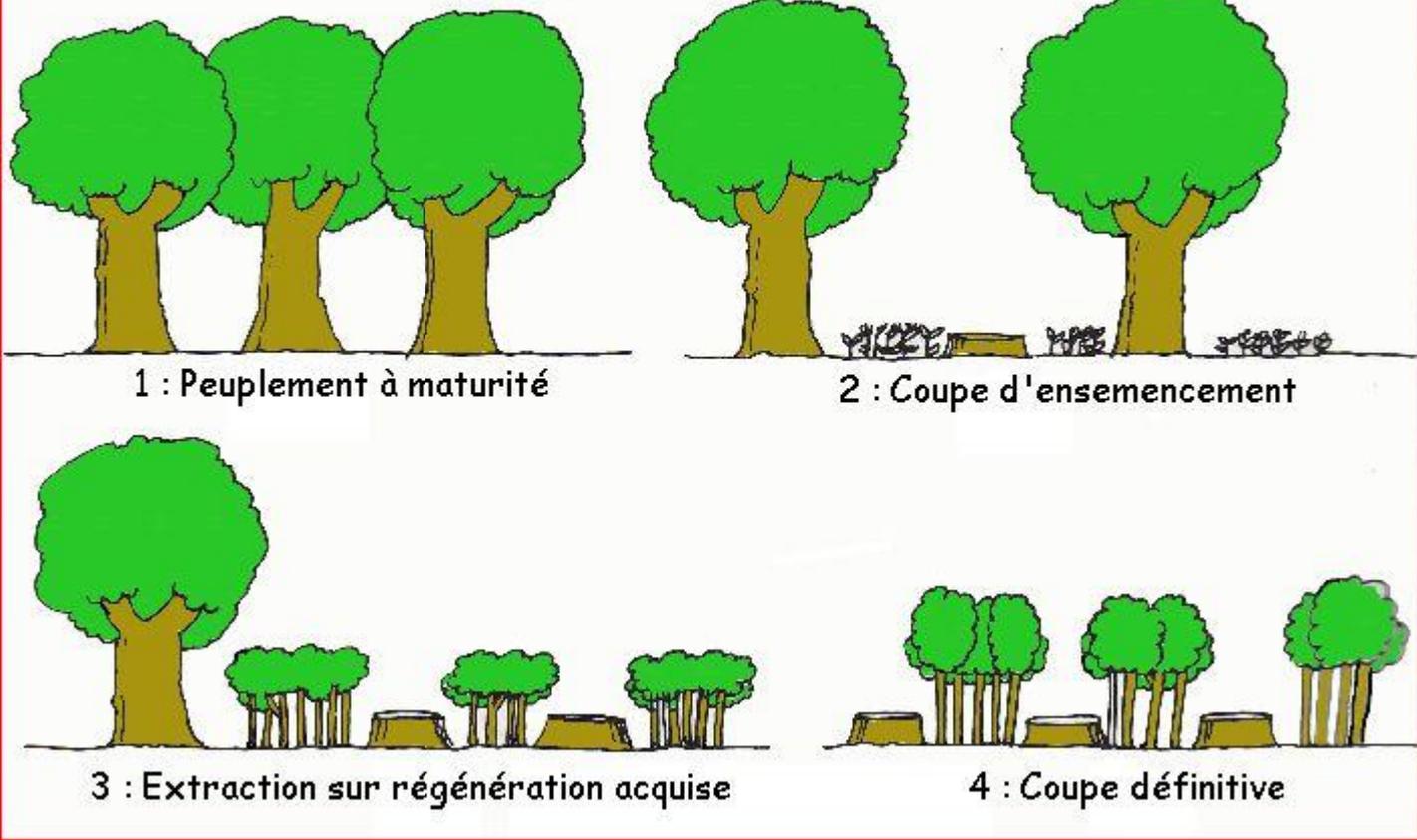
- Mé
- Re
- Éli
- Croisements naturels
- Production de graines et de semis
- Nouvelle génération plus résistante



Fo

nt

### Coupe de régénération



- M
- Re
- Éli
- Cr
- Pr

- Nouvelle génération plus résistante

# Conclusions

- Adaptation des forêts, naturelle ou assistée : processus lent
- Changement climatique rapide
- Incertitudes
- Pour quelles conditions futures améliorer ?

